

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

**Disponibilidade de nutrientes e atividade enzimática do solo em sistemas
integrados de produção agropecuária em terras baixas**

Milena Moreira Peres

Pelotas, 2024

Milena Moreira Peres

Disponibilidade de nutrientes e atividade enzimática do solo em sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas

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 Doutora em Ciências.

Orientador: Professor Dr. Rogério Oliveira de Sousa

Coorientador: Professor Dr. Filipe Selau Carlos

Pelotas, 2024

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

P434d Peres, Milena Moreira

Disponibilidade de nutrientes e atividade enzimática do solo em sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas [recurso eletrônico] / Milena Moreira Peres ; Rogério Oliveira de Sousa, orientador ; Filipe Selau Carlos, coorientador. — Pelotas, 2024.
82 f.

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. Qualidade do solo. 2. Microbiologia. 3. Nitrogênio. 4. Arroz irrigado. I. Sousa, Rogério Oliveira de, orient. II. Carlos, Filipe Selau, coorient. III. Título.

CDD 633.1881

Milena Moreira Peres

Disponibilidade de nutrientes e atividade enzimática do solo em sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas

Tese aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciências, 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: 11/03/2024

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rogério Oliveira de Sousa (Orientador) *Rogério Sousa*
Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dra. Flávia Fontana Fernandes *Flávia Fernandes*
Doutora em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Pesq. Dr. Roberto Carlos Wolter *Roberto Carlos Wolter*
Doutor em Ciências pela Universidade Federal de Pelotas

Dra. Thaís Antolini Veçozzi *Thaís Antolini Veçozzi*
Doutora em Ciências pela Universidade Federal de Pelotas

Resumo

PERES, Milena Moreira. **Disponibilidade de nutrientes e atividade enzimática do solo em sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas.**

Orientador: Rogério Oliveira de Sousa. 2024. 87 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

Sistemas agrícolas que proporcionam a manutenção da matéria orgânica estão diretamente ligados com a disponibilidade de nutrientes para as culturas, pois afetam os parâmetros químicos, físicos e biológicos do solo. O nitrogênio é o elemento que mais sofre influência do sistema de produção adotado. Em função da dinâmica complexa desse nutriente em solos alagados, faz-se necessário conhecer as mudanças que sistemas integrados de produção implicam na disponibilidade de N nesses solos. Diante desta problemática, as hipóteses são: os sistemas integrados de produção agropecuária que incluem o arroz e produção animal promovem a qualidade biológica do solo quando comparados à sistemas de monocultivo de arroz; a biomassa microbiana é responsável por armazenar parte do N em sistemas de rotação de soja com arroz irrigado; e os sistemas de cultivo de arroz irrigado afetam os atributos químicos e microbianos dos solos de terras baixas. Objetiva-se de modo geral neste estudo, caracterizar atributos químicos e microbianos dos solos de terras baixas sob sistemas integrados de produção agropecuária. Foi utilizado um experimento delineado em blocos ao acaso com três repetições, onde foram testados cinco tratamentos: S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade (arroz-azevém pastejado); S3 – rotação com moderada diversidade (arroz – azevém pastejado – soja – azevém pastejado – arroz); S4 - rotação com alta diversidade (arroz – azevém + trevo branco pastejados – capim sudão pastejado – azevém + trevo branco pastejados – soja – azevém + trevo branco pastejados – milho– azevém + trevo branco pastejados – arroz); S5 – Rotação com baixa diversidade (Arroz – azevém + trevo branco + cornichão pastejados – campo de sucessão pastejado – azevém + trevo branco + cornichão pastejados– campo de sucessão pastejado – azevém + trevo branco + cornichão pastejados– campo de sucessão pastejado – azevém + trevo branco + cornichão pastejados – arroz). Os resultados demonstraram que os sistemas que além da soja incluem plantas leguminosas de cobertura tem maior capacidade de armazenar o nitrogênio potencialmente mineralizável, tornando-se um aporte para a cultura do arroz.

Palavras-chave: Qualidade do solo. Microbiologia. Nitrogênio. Arroz irrigado.

Abstract

PERES, Milena Moreira. **Nutrient availability and soil enzymatic activity in integrated agricultural production systems in lowlands.** Advisor: Rogério Oliveira de Sousa. 2024. 87 f. Thesis (Doctorate in Sciences) – Postgraduate Program in Soil and Water Management and Conservation, Faculty of Agronomy Eliseu Maciel, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2024.

Systems that provide the maintenance of organic matter are directly linked to the availability of nutrients for crops, as they affect the chemical, physical and biological parameters of the soil. Nitrogen is the element that is most influenced by the adopted production system. Due to the complex dynamics of this nutrient in flooded soils, it is necessary to know the changes that integrated production systems imply in the availability of N in these soils. Faced with this problem, the hypotheses are: integrated agricultural production systems that include rice and animal production promote the biological quality of a soil when compared to rice monoculture systems; microbial biomass is responsible for storing part of the N in soybean-irrigated rice rotation systems and that irrigated rice cultivation systems affect the chemical and microbial attributes of lowland soils. The general objective of this study is to characterize chemical and microbial attributes of lowland soils under integrated agricultural production systems. An experiment designed in randomized blocks with three replications, where five treatments were tested: S1 – control (fallow rice, without animal presence); S2 – succession with low diversity (grazed rice-ryegrass); S3 – rotation with moderate diversity (rice – grazed ryegrass – soybeans – grazed ryegrass – rice); S4 – rotation with high diversity (rice – ryegrass + grazed white clover – grazed Sudan grass – ryegrass + grazed white clover – soybeans – ryegrass + grazed white clover – corn – ryegrass + grazed white clover – rice); S5 – Low diversity rotation: Rice – ryegrass + white clover + grazed cornichão – grazed succession field – ryegrass + white clover + grazed cornichão – grazed succession field – ryegrass + white clover + grazed cornichão – grazed succession field – ryegrass + white clover + grazed cornichão – rice). The results demonstrated that systems that include leguminous cover crops in addition to soybeans have a greater capacity to store potentially mineralizable nitrogen, becoming a contribution to rice cultivation.

Keywords: Soil quality. Microbiology. Nitrogen. Irrigated rice.

Lista de Figuras

Figura 1-Sequência decrescente de compostos utilizados por microrganismos na respiração anaeróbia.....	28
Figura 2 - Descrição dos sistemas de produção que incluem arroz irrigado em um experimento de longa duração. Fazenda Corticeiras, Cristal, RS. 2023	43
Figura 3- Imagem aérea obtida por satélite da área do protocolo experimental com as respectivas áreas úteis de cada unidade experimental. Fazenda Corticeiras, Cristal, RS. 2013	43
Figura 4 -Respiração basal do solo oriunda de diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas no ano de 2019. Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão da amostra. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade	54
Figura 5- Respiração basal do solo oriunda de diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: não diferiu pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Barras ver	54
Figura 6 - Respiração basal do solo oriunda de diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de e 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: não diferiu pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Barras verticais indicam o desvio padrão da amostra. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade	55
Figura 7 - Carbono da Biomassa Microbiana do solo (CBM) em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas no ano de 2019. Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão da amostra. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade	56

Figura 8 - Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam desvio padrão. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade.....57

Figura 9 -Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam desvio padrão. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade.....57

Figura 10 - Nitrogênio da Biomassa Microbiana (NBM) em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam desvio padrão. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade58

Figura 11- Nitrogênio da Biomassa Microbiana (NBM) em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam desvio padrão. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade59

Figura 12 - Atividade enzimática do solo pelo método de FDA em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. Tukey ($p < 0,05$). S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade61

Figura 13 - Atividade enzimática do solo pelo método de FDA em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais

indicam o desvio padrão. Tukey ($p < 0,05$). S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade61

Figura 14 - Atividade da enzima urease em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si. Tukey ($p < 0,05$). S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade.....62

Figura 15 - Atividade da enzima urease em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam desvio padrão. Médias se62

Figura 16 - Teor de N mineral na forma de NH_4^+ em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade64

Figura 17 - Teor de N mineral na forma de NH_4^+ em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade64

Figura 18- Teor de N mineral na forma de NO_3^- em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si. Tukey ($p < 0,05$). S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade.....65

Figura 19 - Teor de N mineral na forma de NO_3^- em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si. Tukey ($p < 0,05$). S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade.....65

Figura 20 - Teor de N potencialmente mineralizável estimado pelo método da Destilação a Vapor Direta (N-DVD) em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si. Tukey ($p < 0,05$). S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade.....67

Figura 21- Teor de N potencialmente mineralizável estimado pelo método da Destilação a Vapor Direta (N-DVD) em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si. Tukey ($p < 0,05$). S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade.....67

Figura 22 - Concentração de fósforo (P) e potássio (K) extraídos por Melich-1 em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas no ano de 2019. Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão da amostra. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade.....68

Figura 23 - Teor de P extraído por Melich-1 em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si. Tukey ($p < 0,05$).

S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade.....69

Figura 24 - Teor de P extraído por Melich-1 em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si. Tukey ($p < 0,05$).

S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade.....70

Figura 25- Teor de K extraído por Melich-1 em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade70

Figura 26 - Teor de K extraído por Melich-1 em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade71

Figura 27 - Componentes principais e rede de correlações de Pearson para as variáveis químicas teores de NH_4^+ , NO_3^- , P, K e N-DVD (NST), e microbiológicas atividade enzimática FDA, atividade da enzima urease (UR), nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), carbono da biomassa microbiana (CBM) e respiração basal do solo (RB) nos diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no ano de 2020. Cristal/RS.74

Figura 28 -Componentes principais e rede de correlações de Pearson para as variáveis químicas teores de NH_4^+ , NO_3^- , P, K e N-DVD (NST), e microbiológicas atividade enzimática FDA, atividade da enzima urease (UR), nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), carbono da biomassa microbiana (CBM) e respiração basal do solo (RB) nos diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no ano de 2021. Cristal/RS76

Lista de Tabelas

Tabela 1- Caracterização química do solo da área experimental, Fazenda Corticeiras, Cristal, RS, 2013	40
Tabela 2 - Arranjo dos sistemas de produção em espaço e tempo nos dois ciclos de cultivo. Fazenda Corticeiras, Cristal, RS	41
Tabela 3- Manejo da adubação de N, P ₂ O ₅ e K ₂ O no ciclo 1 (2013 a 2016/2017). Fazenda Corticeiras, Cristal, RS	44
Tabela 4 -Manejo da adubação de N, P ₂ O ₅ e K ₂ O no ciclo 2 (2017 a 2020/2021), Fazenda Corticeiras, Cristal, RS	45
Tabela 5 - Importância dos componentes	72
Tabela 6- Cargas fatoriais dos componentes principais 1 e 2 de 2020	72
Tabela 7- Importância dos componentes	74
Tabela 8 - Cargas fatoriais dos componentes principais 1 e 2 de 2021	75

Lista de Abreviações e Siglas

Anammox	Oxidação anaeróbica do amônio
C	Arroz convencional
C/N	Carbono/nitrogênio
CM	Cultivo mínimo
CONAB	Companhia nacional de abastecimento
CTC	Troca de cátions
DON	N orgânico dissolvido
FDA	Diacetato de fluoresceína
ILP	Lavoura-pecuária
MOS	Matéria orgânica
N	Nitrogênio
NH ₄ ⁺	Amônio
Ni	N inorgânico
No	N orgânico
NO ₂ ⁻	Nitrito
NO ₃ ⁻	Nitrato
O ₂	Oxigênio
PD	Plantio direto
PG	Pré-germinado
RS	Rio grande do sul
SIPA	Sistemas integrados de produção agropecuária

Sumário

1. Introdução.....	24
2.Revisão de Literatura.....	27
2.1 O alagamento dos solos de terras baixas	27
2.2 Dinâmica do N e efeitos do alagamento na sua disponibilidade.....	29
2.3. Ação microbiana na degradação de resíduos e fornecimento de N em solos alagados.....	31
2.4. Sistemas de produção de arroz irrigado no Rio Grande do Sul	32
2.5. Sistemas de manejo visando a manutenção da qualidade biológica do solo	35
3 Hipóteses	38
4 Objetivos	39
4.1 Objetivo Geral	39
4.1 Objetivos Específicos.....	39
5 Material e Métodos	40
5.1. Caracterização da área amostrada.....	40
5.2 Coleta das amostras de solo	43
5.3 Manejo hibernar dos sistemas pré-coletas.....	45
5.4. Coletas das amostras para o estudo	46
5.5. Condução das análises químicas.....	46
5.5.1. Teores dos macronutrientes N, P e K.....	46
5.5.2. Nitrogênio Potencialmente Mineralizável.....	47
5.6. Condução das análises microbiológicas.....	47
5.6.1. Carbono da biomassa microbiana do solo	47
5.6.2 Nitrogênio da biomassa microbiana do solo	48
5.7 Respiração basal do solo.....	49
5.8 Atividade da enzima Urease	50

5.9 Atividade enzimática total do solo por Hidrólise do Diacetado de Fluorescína (FDA)	51
5.10. Análises estatísticas dos dados	51
6. Resultados	53
6.1. Parâmetros microbiológicos de qualidade do solo	53
6.1.1. Atividade microbiana através da Respiração Basal do solo	53
6.1.2. Carbono da Biomassa microbiana (CBM)	55
6.1.3. Nitrogênio da Biomassa microbiana (NBM)	58
6.1.4. Atividade de enzimas extracelulares	59
6.2. Parâmetros químicos de qualidade do solo	63
6.2.1. Nitrogênio Mineral do solo	63
6.2.2. Nitrogênio potencialmente mineralizável	66
6.2.3. Teores dos macronutrientes P e K	68
6.3. Análise de Componentes Principais para os parâmetros químicos e microbiológicos	71
7. Discussão	77
8. Conclusão	82
Referências	84

1. Introdução

A atividade orizícola desempenha um importante papel socioeconômico, sendo o arroz um dos principais cereais produzidos e consumidos em todo o mundo (SOSBAI, 2018). De acordo com os dados apresentados pela Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2022), o Brasil exibe a produção de cerca de 10 milhões de toneladas/ano em uma área de pouco mais de 1.4 mil hectares (ha).

Historicamente o Rio Grande do Sul destaca-se como o estado de maior produção, com cerca de 129 municípios, especialmente distribuídos na metade sul do Estado, comprometidos com a cultura do cereal (SOSBAI, 2018). Na safra de 2022/23 a área colhida foi de 823.913 ha e a produtividade média foi de 8.787 kg ha⁻¹. (IRGA, 2023).

A elevada produtividade anual atingida pelo arroz no RS pode ser resultado do alto potencial produtivo das cultivares e aprimoramento do cultivo em terras baixas; a exemplos, estão o parcelamento de nitrogênio (N) e a incorporação da ureia, que proporcionam o melhor aproveitamento da adubação nitrogenada, uma vez que o N possui uma dinâmica complexa, sendo susceptível a perdas por desnitrificação e volatilização, em ambientes alagados (PANDA; NAYAK; MOHANTY, 2019; ISHFAQ et al., 2021).

Ademais, o sistema de rotação com culturas de sequeiro, como a soja, também têm demonstrado importância nas áreas de terras baixas, pois além da possibilidade de rotacionar diferentes mecanismos de ação de herbicidas para o controle efetivo do arroz vermelho e evitar a persistência de plantas daninhas resistentes, os sistemas de rotação de culturas permitem a ciclagem de nutrientes como o N, favorecendo os cultivos e um retorno econômico compensatório (DENARDIN et al., 2020; RIBAS et al., 2021).

Ainda, a implantação de sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) em terras baixas têm apresentado relevância no aumento da produtividade, em razão da remediação dos solos degradados pelo monocultivo intensivo (OVIDO et al., 2020). Os SIPAs podem influenciar a biologia do solo através da quantidade, qualidade e diversidade dos resíduos inseridos, modificações na direção, magnitude e composição do fluxo de nutrientes e alterações benéficas nos atributos físicos e microbiológicos do solo (ANGHINONI, CARVALHO & COSTA, 2013). Além disso, esses sistemas proporcionam a diminuição da dependência de insumos externos, e o

melhor aproveitamento da área na entressafra, já que a inserção de pastagens de inverno ou plantas de cobertura nesse período permite que o espaço seja utilizado por duas atividades ao longo do ano, caracterizando-se como uma escolha mais sustentável e possibilitando um maior retorno econômico para a propriedade (CARMONA et al., 2018).

Alguns solos de terras baixas são caracteristicamente pobres em matéria orgânica (MOS), que, por sua vez, desempenha um papel fundamental na nutrição solo, sendo a principal fonte de N e atuando na capacidade de troca de cátions (CTC) (SOSBAI, 2018). Assim, a incorporação de resíduos orgânicos em solos de terras baixas pode proporcionar uma série de benefícios diretos e indiretos aos cultivos (DHALIWAL et al., 2019). No entanto, a decomposição desse material pela ação dos microrganismos é dependente da relação C/N (carbono/nitrogênio) do resíduo, determinando a taxa com que ocorrerá mineralização de nutrientes (especialmente N) no sistema. De forma geral as gramíneas possuem uma alta relação C/N, com decomposição mais lenta, e uma menor mineralização; em comparação, as leguminosas, possuem uma baixa relação C/N, com rápida decomposição, mas uma alta mineralização de nutrientes (OLIVEIRA et al., 2019). A relação intermediária dos resíduos pode viabilizar a mineralização gradual do N (CALEGARI; COSTA, 2009), sendo um aspecto importante a ser considerado nos SIPAs.

A manutenção da diversidade microbiana do solo também é importante na ciclagem de nutrientes, e em áreas de arroz irrigado contribui para que não haja contaminação do solo e da água decorrentes do uso de defensivos agrícolas, pois muitos destes organismos são responsáveis pela degradação de moléculas químicas (MATTOS, 2015).

Nesse sentido, a atividade microbiana em solos alagados é atribuída à especificidade desses organismos em secretar enzimas que atuam na degradação de diversas moléculas. Polímeros de carbono e nitrogênio das plantas são estruturas complexas que demandam diferentes microrganismos para sua degradação e mineralização (BURNS et al., 2013). A hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) é uma das técnicas que vem sendo amplamente utilizada para avaliar a qualidade microbiológica do solo (GAJDA et al., 2018; SERRI et al., 2022). O FDA é hidrolisado por várias enzimas (lipases, proteases e esterases), presentes nos microrganismos, o que torna o processo um bom indicador da atividade microbiana nos solos (CHÁVEZ et al., 2011). Barbieri et al. (2019), observaram aumento na atividade enzimática na

adoção de sistemas de plantio direto, destacando a influência da temperatura neste incremento.

Diante de um cenário de diversificação de culturas em áreas onde o sistema de arroz predominava como monocultivo, faz-se necessário conhecer as mudanças na qualidade química e biológica do solo que estão sendo geradas a partir da introdução de culturas nos novos modelos de cultivos em terras baixas do Rio Grande do Sul e quais implicações a adoção desses sistemas geram. A partir de estudos que permitam a melhor compreensão da atividade microbiana e da decomposição de resíduos em áreas de arroz irrigado nos novos modelos produtivos, será possível direcionar as práticas de manejo e conservação do solo para o caminho de uma agricultura econômica e ambientalmente sustentável.

2.Revisão de Literatura

2.1 O alagamento dos solos de terras baixas

O Bioma Pampa é um conjunto de ecossistemas que no Brasil situa-se apenas no Rio Grande do Sul, sendo aproximadamente dois terços da área do Estado ocupada por este bioma (LEMOS; RIZZI, 2020). As áreas de terras baixas são regiões com altitude de até 200 metros, e estão localizadas em sua maioria no Bioma Pampa, ocupando aproximadamente 4,4 milhões de hectares (PINTO; MIGUEL; PAULETTO, 2017).

As classes de solos encontradas nas terras baixas têm como principal característica a má drenagem. Nestas áreas, o solo fica encharcado na maior parte do tempo devido à baixa ou nula condutividade hidráulica (TIMM et al., 2017). Os Gleissolos e os Planossolos são exemplos típicos de solos de terras baixas e têm como principal aptidão o cultivo de arroz, pois são propícios ao sistema de irrigação por inundação (STRECK et al., 2018). Em grande parte do tempo, as áreas típicas de produção de arroz irrigado permanecem saturadas por água ou alagados, formando um ambiente com condições anóxicas, caracterizado pela baixa ou nula concentração do oxigênio (O₂), devido à sua baixa taxa de difusão na água, fazendo com que o consumo desse gás pelos microrganismos seja maior que o suprimento.

No entanto, o solo saturado não encontra-se totalmente livre de oxigênio, observando-se um gradiente de concentração, onde é possível apresentar uma pequena camada oxidada próxima à superfície, e uma maior parte, no estado reduzido em profundidade (CAMARGO; SANTOS; ZONTA, 1999). Especificamente no cultivo do arroz irrigado, há também a liberação de O₂ pelas raízes das plantas e a formação de uma área de oxidação ao redor delas, chamada de rizosfera (GOMES et al., 2021).

Tanto o gradiente de concentração existente na superfície quanto a zona da rizosfera permitem que em ambientes alagados haja a presença de uma diversidade de microrganismos. Na camada oxidada encontram-se microrganismos aeróbios obrigatórios, aqueles que somente crescem na presença de oxigênio molecular enquanto na camada reduzida predominam os anaeróbios, aqueles que só sobrevivem na ausência de O₂, ou os anaeróbios facultativos, aqueles que sobrevivem tanto na presença como na ausência de O₂ (SOUSA, CAMARGO & VAHL, 2000; CARDOSO & ANDREOTE, 2016).

Em solos alagados os microrganismos utilizam diferentes compostos (que não o O_2) como receptores finais de elétrons em seu processo de respiração, sendo estes, reduzidos em ordem decrescente de afinidade de acordo com seu grau de oxidação (CARVALHO; CAMPOS; FAGERIA, 2011) (Figura 1). O nitrato (NO_3^-) é o primeiro composto reduzido pelos microrganismos em ambientes anaeróbios (SOUSA; VAHL; OTERO, 2009) o que pode afetar diretamente a disponibilidade de N para o arroz.

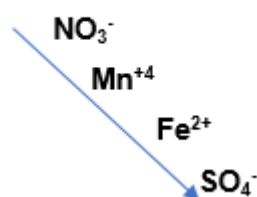


Figura 1-Sequência decrescente de compostos utilizados por microrganismos na respiração anaeróbia
Fonte: SOUSA; VAHL; OTERO, 2009

Em solos ácidos cultivados com arroz, após o alagamento, uma das primeiras mudanças a ocorrer é em relação ao pH. Em primeiro momento, devido ao aumento da concentração de CO_2 dissolvido na água há uma diminuição, de acordo com a reação 1 (CAMARGO; SANTOS; ZONTA, 1999):



Após estabelecido o alagamento, em função das reações de oxirredução ocorrerem, com consumo de H^+ , há uma elevação significativa de pH que implica no aumento da disponibilidade de alguns nutrientes (PONNAMPERUMA, 1972). O pH no meio, estabilizado em torno de 6,5 a 7,0 (VAHL, 1999), controla o equilíbrio químico e regula as reações de precipitação e dissolução, adsorção e dessorção bem como a concentração de íons na solução do solo (SOUSA; CAMARGO; OTERO, 2009).

A atividade das bactérias anaeróbicas nestes solos tem como produtos, o dióxido de carbono, hidrogênio molecular, metano, amônia, aminas, mercaptanos, gás sulfídrico e resíduos parcialmente humificados (PONNAMPERUMA, 1972). Quando ocorre o processo de fermentação, há ainda a formação de alguns ácidos orgânicos como o ácido acético e lático.

2.2 Dinâmica do N e efeitos do alagamento na sua disponibilidade

Cerca de 95% do N presente no solo está na forma orgânica. Para que estas formas sejam convertidas em inorgânicas e assimiláveis pelas plantas (NH_4^+ e NO_3^-), é necessário que ocorra um processo enzimático chamado de mineralização (RHODEN *et al.*, 2006). A conversão do N orgânico (No) em N inorgânico (Ni) pode ocorrer tanto em ambientes com boa aeração quanto em ambientes alagados, e neste caso, são os microrganismos anaeróbios ou aeróbios facultativos que utilizam resíduos vegetais como fonte de C, N e energia, que realizam este processo (VIEIRA, 2017).

O alagamento das áreas de terras baixas é responsável por diversas mudanças na dinâmica do N, em função da ocorrência das reações de oxirredução (POCOJESKI, 2011). A fonte de N do solo é a matéria orgânica (MOS), oriunda de restos culturais, coberturas vegetais ou resíduos animais (DHALIWAL *et al.*, 2019). A MOS é primeiramente mineralizada à amônio (NH_4^+) para posteriormente sofrer o processo de nitrificação e formar o nitrato (NO_3^-), principal fonte de N para a maioria das plantas. A nitrificação é mediada por bactérias aeróbias, portanto, na camada reduzida das áreas cultivadas com arroz irrigado o No pode não se transformar em NO_3^- , havendo a tendência da mineralização encerrar-se com o acúmulo de NH_4^+ no solo, sendo esta, portanto, a forma de N mineral estável em solos alagados (SOUZA, 2017).

Devido à formação do gradiente de concentração do oxigênio nos solos alagados, o NH_4^+ que está na zona oxidada é convertido em NO_3^- e por difusão chega à zona reduzida, onde sofre o processo de desnitrificação até N_2 , que facilmente escapa para a atmosfera, sendo esta considerada a principal forma de perda de N no cultivo de arroz irrigado (MASCARENHAS, 2018).

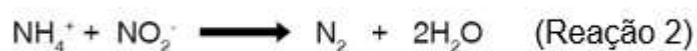
Com o intuito de diminuir as perdas de N por desnitrificação nas lavouras de arroz irrigado, recomenda-se que não sejam utilizadas fontes nítricas na adubação, predominando desta forma, a ureia, fonte amídica do nutriente. O processo de degradação da ureia no solo só é possível pela presença de microrganismos que secretam a enzima urease. Esta enzima hidrolisa a molécula de ureia formando o carbonato de amônio, que ao se decompor origina amônio, bicarbonato e hidroxila (VIEIRA, 2017). Esta reação é determinante no processo de perda de N por volatilização.

Apesar das fontes amídicas estarem sujeitas à volatilização, práticas de manejo são adotadas visando minimizar tais perdas. A volatilização de N em solos alagados pode ser reduzida quando a ureia é aplicada em solo seco seguida por inundação imediata (KNOBLAUCH *et al.*, 2012). Isto se dá em função das condições menos favoráveis à hidrólise pela urease e à formação de amônia no interior do solo, como o pH mais ácido e a temperatura mais amena.

Silva, Pocojeski e Rhoden (2011) demonstraram tais efeitos ao incubar de forma anaeróbia solos de terras baixas do RS por 24 semanas. Os autores observaram que diferentes quantidades de NO_3^- presentes nesses solos antes do alagamento foram perdidas ocasionando predomínio de NH_4^+ , regulando assim a forma e a disponibilidade de N para as plantas.

Apesar da desnitrificação e volatilização serem consideradas as principais causas do baixo aproveitamento dos adubos nitrogenados nos solos de terras baixas cultivados com arroz, recentemente novas rotas de perdas de nitrogênio estão sendo observadas, como é o caso da Oxidação Anaeróbica do Amônio (*Anammox*) (VIEIRA, 2017; MASCARENHAS, 2018). Este processo vem sendo considerado em função da identificação das bactérias desencadeadoras dessa oxidação terem sido encontradas em ambientes cultivados com arroz sob alagamento (STROUS *et al.*, 1997).

Para que ocorra a *Anammox* é necessário que o nitrito (NO_2^-) esteja presente no ambiente (Reação 2). Podendo ser esta a causa de poucos estudos considerarem o processo, visto que a permanência do NO_2^- no sistema é muito rápida.



Apesar da contribuição da *Anammox* ser considerada ínfima, se comparada à desnitrificação, Nie *et al.* (2018) observaram a partir da atividade das bactérias anamóbicas 6,2% a 7,8% da perda total de nitrogênio nos solos cultivados com arroz alagado, sendo o restante devido à desnitrificação.

Apesar das perdas relatadas por *Anammox* não ultrapassarem 10% do total do N perdido (SHEN *et al.*, 2013; NIE *et al.*, 2019), há de se considerar que é uma possível causa de liberação de N_2 para a atmosfera em alguns solos, evidenciando que a complexa dinâmica do N em ambientes alagados ainda deve ser melhor compreendida.

2.3. Ação microbiana na degradação de resíduos e fornecimento de N em solos alagados

A maioria dos processos que envolvem a perda de N em solos alagados estão relacionados com a atividade dos microrganismos (BATISTA et al., 2018). Grande parte da microbiota presente atua nos processos de mineralização e imobilização do N, podendo representar uma certa quantidade de nutrientes para as plantas, visto que a biomassa microbiana em alguns casos pode armazenar até 100 kg de N por hectare (ANDREOLA & FERNANDES, 2007). Esta capacidade de armazenar N varia em função do material orgânico presente no solo.

A relação C/N é dada pela razão entre C e N do resíduo vegetal, sendo influenciada por fatores bioquímicos do vegetal (ABBASI et al., 2015), onde espécies de leguminosas apresentam menor relação quando comparadas às gramíneas (SILVEIRA et al., 2020). Esta característica é amplamente utilizada para prever a disponibilidade de N no solo durante o processo de decomposição de resíduos orgânicos (NICOLARDOT; RECOUS; MARY, 2001; TRUONG; MARSCHNER, 2018).

A velocidade de decomposição pela microbiota e liberação de N dos resíduos vegetais de plantas de cobertura é inversamente proporcional à relação C/N do material e diretamente proporcional às concentrações totais deste elemento na fitomassa (AITA; GIACOMINI, 2003). Esta relação pode afetar a disponibilidade de N em sistemas de rotação de culturas por influência do processo de imobilização, onde a adição de fontes de C e N podem levar à fixação de N na constituição celular dos microrganismos (ANDREOLA; FERNANDES, 2007).

A imobilização consiste na conversão do N inorgânico (NH_3 , NH_4^+ , NO_3^- e NO_2) em N orgânico. É um processo que requer grande quantidade de energia, sendo o NH_4^+ a forma preferencial absorvida pelos microrganismos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; VIEIRA, 2017). Segundo Vargas, Selbach e Sá (2005), a imobilização microbiana do N mineral aplicado como fertilizante em sistemas de plantio direto pode ser uma das causas da menor disponibilidade de N para cultivos em rotação ou sucessão. Os autores observaram maior imobilização do N em sistema de plantio direto quando comparado ao convencional. Liu et al. (2022) observaram que a aplicação de palha no plantio direto aumentou os teores de N da matéria orgânica particulada e N da biomassa microbiana quando em comparação ao sistema

convencional, mas diminuiu o teor de N orgânico dissolvido (DON), o que refletiria a imobilização intensiva de DON microbiano de resíduos vegetais com alta relação C/N.

Em sistemas de sucessão de culturas, a decomposição das plantas de cobertura pode colaborar para o equilíbrio de nutrientes e, ao longo do tempo, aumentar a fertilidade do solo (MARCELO et al., 2009; SILVEIRA et al., 2020). Espera-se também que, em curto prazo, a adição de resíduos com diferentes características proporcione mudanças nas taxas de mineralização e imobilização de Nitrogênio (N) no solo e que, em longo prazo, possa alterar a fração de N-orgânico disponível (POLLET et al., 2019).

Para tal benefício, selecionam-se plantas de cobertura com potencial produtivo de biomassa e que tenham a capacidade de acumular, entre outros elementos, carbono e nitrogênio, sendo essencial compreender os processos de decomposição e liberação de nutrientes desses resíduos (DONEDA et al., 2012).

Tete, Viaud e Walter (2015) observaram influência das condições redox na mineralização líquida de N em solo permanentemente alagado, sendo esta, menor, quando comparada à solos em condições de capacidade de campo. Neste contexto, faz-se necessário conhecer melhor a contribuição da atividade microbiana e da presença de resíduos vegetais em solos alagados na disponibilidade de N no cultivo de arroz, e a influência dessas alterações nos cultivos de sequeiro introduzidos nessas áreas.

2.4. Sistemas de produção de arroz irrigado no Rio Grande do Sul

De acordo com a SOSBAI (2018) os sistemas de cultivo do arroz irrigado são divididos em quatro: Sistema convencional; Sistema cultivo mínimo; Sistema Plantio direto e Sistema pré-germinado.

O sistema convencional é caracterizado pelo intenso revolvimento de solo sendo dividido em preparo primário e secundário. No preparo primário realizam-se as operações de adequação do solo em maiores profundidades, onde o arado é o implemento mais utilizado, objetivando romper as camadas compactadas bem como as raízes das invasoras presentes. O preparo secundário, normalmente utiliza grades e plainas para destorroamento, incorporação de resíduos e nivelamento do terreno. Cabe ressaltar que em função da utilização de maquinário pesado, esse manejo deve ser realizado com uma umidade correta, não úmido suficiente para o solo aderir no

implemento, gerar mais esforço, gasto de combustível e desgaste bem como danos à estrutura física do solo devido à compactação pelo tráfego das máquinas.

Práticas de intenso revolvimento de solo associadas à resistência do arroz daninho aos herbicidas levaram os produtores a adotarem um sistema que permitisse que o banco de semente de arroz vermelho e preto fosse revolvido com antecedência de modo que no inverno as plantas pudessem ser controladas com outros modos de ação herbicida, adotando-se assim o chamado cultivo mínimo. Caracterizado por deixar de lado o preparo primário este sistema tem por premissa o revolvimento antecipado da camada arável (inverno, verão anterior e até mesmo pós colheita) posterior confecção das taipas, emergência das plantas daninhas e dessecação. Neste caso a semeadura é realizada sobre a palha dessecada, tendo menor revolvimento de solo.

Tendo como base os fundamentos básicos do plantio direto, este sistema objetiva o mínimo revolvimento do solo, cobertura permanente e rotação/ sucessão de culturas. A inserção da soja nas áreas de várzea possibilitou a rotação de culturas, tornando uma alternativa para o sistema, além disso, produtores que adotam este sistema utilizam durante o inverno espécies forrageiras como azevém, aveia e trevo para cobertura vegetal ou para pastejo. No SPD a semeadura é feita sobre a palha da planta de cobertura dessecada.

Apesar de todos os benefícios associados ao SPD, a adoção do sistema de plantio direto de arroz irrigado possui algumas limitações. Em função do cultivo do arroz ser realizado sob sistema de irrigação por inundação, muitas vezes a colheita é realizada em solo encharcado, levando a uma desestruturação do terreno, fazendo-se necessário muitas vezes a operação de confecção das taipas e até mesmo preparo secundário. Carmona e seus colaboradores (2018) apesar de defenderem a adoção dos sistemas integrados em terras baixas reconhecem que adoção de novos arranjos produtivos em solos de várzea passa por diversas divergências, entre elas o fato de que grande parte das áreas cultivadas com arroz são arrendadas, ou seja o produtor de arroz não é o mesmo que utiliza o campo no inverno, dificultando assim o manejo correto do sistema. Outro fator relevante é o fato que a maioria das semeadoras de arroz não são adequadas para este sistema, e a plantabilidade em áreas com cobertura de inverno é prejudicada. Além disso, a decomposição desses resíduos em solos alagados é lenta e pode acarretar em prejuízos para o estabelecimento da cultura.

O sistema pré-germinado é caracterizado pela semeadura em solo já com lâmina de água, e pode ser realizada de forma manual, tratorizada ou de avião. O preparo de solo consiste em arações e gradagens em solo seco e posterior alagamento e uso da enxada rotativa com tratores com rodas de ferro na lama para auxiliar no controle das plantas daninhas, após é feito um nivelamento do terreno na lama, operação que antecede a semeadura.

Nos sistemas convencional, mínimo e PD a adubação é realizada em solo seco, sendo P e K aplicados na base (podendo em função da quantidade e da operação serem aplicados em pós semeadura), antes da semeadura para garantir melhor eficiência das operações e nitrogênio aplicado uma parte na base e outra parte na cobertura em solo seco antecedendo a entrada da irrigação e outra parte na lavoura já irrigada de acordo com os estádios fenológicos da cultura. No sistema pré-germinado o nitrogênio não é aplicado na semeadura para evitar perdas, mas sim fracionado em duas ou três partes ao longo do desenvolvimento da cultura, dependendo do ciclo da cultivar. O P e o K, neste sistema, são aplicados e incorporados na formação da lama ou antes do nivelamento pré semeadura.

O SPD permite que a adubação (P e K) possa ser realizada em diferentes fases, podendo ser dividida entre as culturas de verão e de inverno, visto que este sistema colabora para a ciclagem de nutrientes e manutenção da fertilidade do solo com a adubação sendo realizada também na cultura de menor extração (FARIAS et al., 2020). Para que seja possível adotar a adubação de sistemas é necessário que o nutriente esteja acima do nível crítico no solo, com isso muitos estudos ainda devem ser realizados para melhor elucidar o comportamento de fósforo e potássio nesses sistemas para que de fato possam ser recomendados aos produtores.

O Instituto Rio-grandense do arroz é uma entidade que gera informações, pesquisa e produtos e orienta produtores e técnicos acerca dos manejos adequados para a cultura, sendo este responsável pelo contato direto com o produtor e o levantamento de informações como área plantada, cultivares, produtividade e sistemas de plantio adotado, informações essas renovadas a cada ano agrícola. De acordo com o IRGA na safra 2021/22 os sistemas de arroz convencional (C), cultivo mínimo (CM) e plantio direto (PD) e pré-germinado (PG) ocupam 18%, 57,9%, 10,6% e 13,3% do total da área cultivada com arroz irrigada no RS, respectivamente, porém na safra 2017/2018 a realidade era outra (24,1% PC; 63,4% CM; 2,4% PD e 10,1%PG). Nota-se, portanto, analisando os boletins do IRGA (2018; 2022) que houve

uma redução na área cultivada com arroz (de 1 milhão de ha para 850 mil, aproximadamente) e um aumento da adoção do sistema de plantio direto, corroborando com descrito por Carmona e seus colaboradores que em 2018 este número não passava de 5%. Possivelmente, a redução da área com arroz e o aumento das áreas de PD sejam reflexo da inserção da soja em propriedades tipicamente arrozeiras assim como da mudança de paradigmas dos produtores em função do aumento das informações acerca dos benefícios das plantas de cobertura em solos de terras baixas.

2.5. Sistemas de manejo visando a manutenção da qualidade biológica do solo

Como alternativa às práticas empregadas no sistema convencional, especialmente no que tange ao revolvimento intensivo de solo e que resulta em perda de grande parte da matéria orgânica, manejos que visam contribuir para a manutenção do carbono orgânico e da atividade biológica do solo têm sido adotados. Nesse sentido, considera-se cada vez mais a adoção do sistema de plantio direto (DENARDIN et al., 2019).

Em solos hidromórficos, como aqueles propícios ao cultivo de arroz irrigado, a semeadura direta pode contribuir para o acúmulo de carbono orgânico nas camadas superficiais (NASCIMENTO et al., 2009). Entre as novas práticas adotadas pelos agricultores, utilizadas em áreas de várzea, está a rotação do arroz irrigado com a cultura da soja, que teve um avanço significativo nas últimas safras. A área semeada com a oleaginosa em rotação com o arroz irrigado, no Rio Grande do Sul, no ano agrícola de 2022/2023 ultrapassou os 500 mil ha, um incremento de 38 vezes na área cultivada desde a introdução da soja em rotação, no ano agrícola de 2009/2010 (IRGA, 2022).

O principal objetivo da introdução da cultura de sequeiro nas áreas de terras baixas é o controle do arroz vermelho (*Oriza sativa* L.), já que com a rotação é possível utilizar diferentes mecanismos de ação de herbicidas, mais eficientes no controle do arroz daninho e outras plantas invasoras (CASSOL et al., 2015). Porém, outros benefícios são atribuídos ao sistema, como o retorno econômico, a melhoria da qualidade do solo (ANGHINONI; CARLOS, 2018) o potencial mitigador de emissões de CH₄ (SILVEIRA, 2018) e a diminuição da resistência de invasoras à herbicidas.

As limitações nos atributos físicos do solo como deficiência de drenagem decorrente da baixa condutividade hidráulica dos solos e compactação são apontadas como as principais dificuldades de cultivo da soja após o arroz irrigado em terras baixas, acarretando problemas no crescimento e desenvolvimento das plantas (BAMBERG et al., 2009). Alternativas como a utilização de escarificação e semeadura com haste sulcadora tem gerado bons resultados de produtividade da cultura de sequeiro em solos com camada compactada próximo à superfície (SARTORI et al., 2015).

Outro importante manejo associado ao plantio direto, adotado por produtores orizícolas, é a utilização de plantas de cobertura durante o inverno, principalmente espécie forrageiras poáceas e fabáceas. Além de favorecer a conservação do solo, através da diminuição das perdas por erosão, a cobertura vegetal contribui para a manutenção da qualidade física e química do solo (HEI et al., 2021; WEINERT, et al., 2023).

Aliado à semeadura direta e ao uso de plantas de cobertura de inverno, muitos produtores buscam estratégias para diminuir custos com o manejo conservacionista da implantação de forrageiras de inverno. Uma alternativa para o retorno econômico associado ao manejo sustentável da área é a atividade de pecuária durante o período de entressafra (SILVEIRA et al., 2020).

Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs), que associam lavoura-pecuária (ILP), consistem em criar um ciclo fechado de produção. A pastagem fornece a cobertura para o solo e os resíduos culturais para o plantio direto; ao mesmo tempo, a atividade biológica e a ciclagem de nutrientes são incentivadas pela produção de excreções dos animais; e por fim, o uso de fertilizantes na produção de grãos beneficia o vigor das forrageiras (SILVA et al., 2014; FRANZLUEBBERS et al., 2014).

Estes sistemas consolidam-se ao redor do mundo (KASSAM; FRIEDRICH; DERPSCH, 2019). Assim como no Brasil, alguns países como Estados Unidos e França descrevem melhorias na qualidade do solo com a implantação de sistemas de integração, como o aumento da matéria orgânica em superfície, reduções das perdas de N para a atmosfera e promoção do sequestro de C (SOUSSANA; LEMAIRE 2014).

Neste sentido, Martins et al. (2017) sugerem que a produção orizícola nas terras baixas do Brasil, baseada em monocultura e cultivo intensivo demonstra-se como uma prática ambiental e economicamente insustentável. No entanto, Denardin et al. (2019)

sugerem que tanto os benefícios atribuídos, incluindo melhorias nas qualidades químicas e biológicas do solo quanto os reflexos na produtividade do arroz, decorrentes do plantio direto nesses sistemas, só são possíveis de serem observados ao longo dos anos de consolidação da prática.

O comportamento da decomposição de resíduos em solos alagados ainda é pouco conhecido. Estudos feitos por Rhoden et al. (2006) não encontraram correlações entre a relação C/N da MOS em ambientes alagados com a absorção de N pelas plantas de arroz. Porém, em decorrência do possível aumento da atividade biológica, estudos com mineralização de materiais vegetais em solos alagados devem ser melhor elucidados, a fim de que seja possível determinar as reais implicações que as práticas de sucessão ou rotação de culturas podem trazer ao cultivo do arroz irrigado em curto e longo prazo.

A qualidade do solo pode ser caracterizada a partir de indicadores físicos, químicos e biológicos do solo. Os indicadores biológicos são medidos a partir das respostas dos organismos vivos às mudanças em seus ambientes (DENARDIN et al., 2019). Nesse sentido, estudos enzimáticos podem ser bons indicadores da atividade biológica de um solo sob manejo, pois podem apontar seu potencial em degradar substratos e sua importância na ciclagem de nutrientes e outros processos (DICK; BREACKWELL; TURCO, 1996). Da mesma forma, a matéria orgânica (MOS), e os fatores que afetam a sua manutenção nos solos, são considerados eficientes indicadores para caracterizar a qualidade de um solo governado por sistemas de manejo (CONCEIÇÃO et al., 2005; BISWAS et al., 2017; SIHI et al., 2017).

Nas terras baixas do sul do Brasil a qualidade do solo pode ser afetada a partir da adoção de novos sistemas de produção. Martins et al. (2017) observaram tal efeito em curto prazo, destacando a importância de estudos adicionais para avaliar o status destas mudanças ao longo do tempo.

3 Hipóteses

- Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs) que incluem arroz irrigado, culturas de sequeiro e produção animal promovem melhoria na qualidade química e microbiológica de um solo quando comparados ao sistema de monocultivo de arroz;
- Os sistemas integrados de produção agropecuária que incluem leguminosas e pastejo têm maior potencial de manter o suporte de nitrogênio mineralizável no solo.
- A atividade enzimática do solo é favorecida em sistemas produtivos com maior diversidade de manejos.

4 Objetivos

4.1 Objetivo Geral

Estabelecer relação entre os efeitos a longo prazo nos parâmetros químicos e microbiológicos de qualidade do solo e a adoção de sistemas integrados de produção agropecuária que incluem o alagamento em áreas de terras baixas.

4.1 Objetivos Específicos

- Avaliar o efeito da produção de arroz irrigado no comportamento da atividade enzimática oriunda da ação microbiana em experimento de longa duração com sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas;
- Avaliar as alterações nos estoques de carbono e nitrogênio microbiano decorrentes da adoção de sistemas integrados de produção agropecuária por longo período;
- Determinar o potencial do histórico de uso da área em manter a qualidade química do solo.

5 Material e Métodos

5.1. Caracterização da área amostrada

A área experimental, localizada no município de Cristal/RS (31 ° 37'13 '' S, 52° 35'20''O, 28) possui 18 ha e esteve em pousio por 3 anos antes da implantação do protocolo experimental, no ano de 2013. O clima da região é quente e úmido no verão (Cfa), de acordo com a classificação de Köppen, e a temperatura média é de 18,3 °C, com precipitação média anual de 1.522 mm. A área experimental possuía um relevo plano, assim como a maioria das áreas características de cultivo de arroz irrigado no extremo Sul do Brasil. A classificação taxonômica descreve o solo como um Planossolo, com uma textura franco-argilo-arenosa, com 24% de argila, 23% de silte e 53%, de areia (MARTINS et al., 2017).

A caracterização química do solo inicial foi realizada a partir de coletas efetuadas em março de 2013, conforme descrito (Tabela 1).

Tabela 1- Caracterização química do solo da área experimental, Fazenda Corticeiras, Cristal, RS, 2013

Atributo químico do solo	Camada de solo (m)		
	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,4
pH em água	5,5	5,3	5,1
Carbono orgânico (g kg ⁻¹)	18	12	9
P disponível (mg dm ⁻³)	10	5	3
K disponível (mg dm ⁻³)	76	36	26
Ca trocável (cmolc dm ⁻³)	3,5	2,9	1,7
Mg trocável (cmolc dm ⁻³)	2,3	2,2	1,3
CTCpH7,0 (cmolc dm ⁻³)	10,6	12,2	12,1
Saturação por bases (%)	56	43	26
Saturação por Al (%)	3	12	35

Fonte: Resultados originais da pesquisa, 2023

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⁻¹. Fonte: Marcelo Ely, IRGA.

No mês de abril de 2013, procedeu-se o preparo convencional do solo da área experimental, empregando arado e realizando duas operações com grade niveladora. Entre as etapas de gradagem, procedeu-se à calagem, aplicando 4,5 Mg ha⁻¹ de calcário (PRNT 70%) conforme CQFS RS/SC (2004), objetivando elevar o pH 6,0 a

camada 0-0,2 m. Após a correção do solo foram implantados os sistemas, tendo início com a semeadura das pastagens de inverno (Tabela 2).

Tabela 2 - Arranjo dos sistemas de produção em espaço e tempo nos dois ciclos de cultivo. Fazenda Corticeiras, Cristal, RS

Ciclos / Sistemas	Ano	Estação	S1	S2	S3	S4	S5
Ciclo 1 (2013-2016)	2013	out-inv	pousio	azevém	azevém	Az.+TB	Az.+TB+ Corn.
	2013	prim-ver	arroz	arroz	soja	sudão	campo
	2014	out-inv	pousio	azevém	azevém	Az.+TB	Az.+TB+ Corn.
	2014	prim-ver	arroz	arroz	arroz	soja	campo
	2015	out-inv	pousio	azevém	azevém	Az.+TB	Az.+TB+ Corn.
	2015	prim-ver	arroz	arroz	soja	milho	campo
	2016	out-inv	pousio	azevém	azevém	Az.+TB	Az.+TB+ Corn.
	2016	prim-ver	arroz	arroz	arroz	arroz	arroz
Ciclo 2 (2017-2020)	2017	out-inv	pousio	azevém	azevém	Az.+TB	Az.+TB+ Corn.
	2017	prim-ver	arroz	arroz	soja	sudão	campo
	2018	out-inv	pousio	azevém	azevém	Az.+TP	Az+TP+ Corn.
	2018	prim-ver	arroz	arroz	arroz	soja	campo
	2019	out-inv	pousio	azevém	azevém	Az.+TP	Az+TP+ Corn.
	2019	prim-ver	arroz	arroz	soja	milho	campo
	2020	out-inv	pousio	azevém	azevém	Az.+TP	Az+TP+ Corn.
	2020	prim-ver	arroz	arroz	arroz	arroz	arroz

Fonte: Resultados originais da pesquisa, 2023

Nota: Az. = Azevém; TB = Trevo Branco; TP = Trevo Persa; Corn. = Cornichão; S1, (convencional) com pousio no inverno e preparo de solo; S2 ao S5, com pastejo e semeadura direta. Fonte: Marcelo Ely, IRGA.

Os tratamentos utilizados consistem em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) em terras baixas do RS, que consideram: 1) diversidade espaço-temporal de culturas; 2) intensidade temporal dos cultivos comerciais; e 3) manejo espaço-temporal do solo. Essas variáveis são arranjadas de modo a representarem modelos de produção para os diferentes cenários no RS, tendo o arroz irrigado como a cultura de referência.

Na implantação do protocolo, os tratamentos foram alocados em cinco sistemas, organizados em um delineamento experimental de blocos casualizados, com três repetições, sendo eles:

- Sistema 1 (S1): testemunha sem a presença de animal no sistema. Este sistema é considerado como dominante na maioria dos casos no Rio Grande do Sul,

serve de tratamento controle em relação aos demais sistemas, caracterizando-se como monocultivo, tendo mantido arroz – pousio – arroz até a safra 2020/2021.

- Sistema 2 (S2): é caracterizado por uma sucessão de culturas com baixa diversidade (arroz – azevém pastejado – arroz). Este modelo compreende o perfil das pequenas e médias propriedades do Sul do Brasil. A implantação de azevém no inverno possibilita o pastejo e, por consequência, um melhor uso da terra num período normalmente ocioso.

- Sistema 3 (S3): representa uma rotação com moderada diversidade (arroz – azevém pastejado – soja – azevém pastejado – arroz). É um sistema muito comum tanto em pequenas, quanto em médias e grandes propriedades do Sul do Brasil. A soja entra para agregar qualidade ao solo e serve como ferramenta de controle de plantas daninhas. O cultivo de azevém no outono/primavera possibilita um incremento econômico com a atividade pecuária.

- Sistema 4 (S4): representa um sistema de rotação com alta diversidade (arroz – azevém + trevo branco pastejados – capim sudão pastejado – azevém + trevo branco pastejados – soja – azevém + trevo branco pastejados – milho– azevém + trevo branco pastejados – arroz). Cenário de médias e grandes propriedades no Sul do Brasil, busca otimizar um sistema de rotação que prevê o cultivo de arroz a cada quatro anos, pela inserção no sistema, de maior diversidade de espécies.

- Sistema 5 (S5): representa uma rotação com baixa diversidade: Arroz – azevém + trevo branco + cornichão pastejados – campo de sucessão pastejado – azevém + trevo branco + cornichão pastejados– campo de sucessão pastejado – azevém + trevo branco + cornichão pastejados– campo de sucessão pastejado – azevém + trevo branco + cornichão pastejados – arroz. Sistema comum de produção nas grandes propriedades do Sul do Brasil, Uruguai e Argentina. Sendo esse o único sistema que recebeu a cultura do arroz apenas em duas safras durante os 8 anos de duração do protocolo experimental.

Cabe ressaltar que o protocolo experimental na safra 2020/2021 completou 8 anos, onde estava previsto o cultivo de arroz irrigado em todos os sistemas, sendo precedidos pelas rotações ou sucessões conforme descritas anteriormente e apresentadas na Figura 2.



Figura 2 - Descrição dos sistemas de produção que incluem arroz irrigado em um experimento de longa duração. Fazenda Corticeiras, Cristal, RS. 2023

Fonte: Elaborada pela autora

5.2 Coleta das amostras de solo

Para a caracterização química e microbiológica foram coletadas 10 subamostras, que após homogeneizadas compuseram uma amostra composta em cada unidade experimental, sendo estas compostas de áreas de aproximadamente 1 ha (Figura 3).



Figura 3- Imagem aérea obtida por satélite da área do protocolo experimental com as respectivas áreas úteis de cada unidade experimental. Fazenda Corticeiras, Cristal, RS. 2013

Fonte: Marcelo Ely, IRGA

O manejo da adubação do experimento assim como a semeadura e os tratos culturais em comum eram desenvolvidos pela equipe multidisciplinar responsável pela condução, ficando a cargo do IRGA a execução dos mesmos. A quantidade aplicada de NPK durante os anos de experimentos pode ser observada nas tabelas abaixo (Tabela 3 e 4).

Tabela 3- Manejo da adubação de N, P₂O₅ e K₂O no ciclo 1 (2013 a 2016/2017). Fazenda Corticeiras, Cristal, RS

Estação	Ano / Safra	Dose de N-P ₂ O ₅ -K ₂ O aplicada (kg ha ⁻¹)		
		SC	SIPA	SIPA soja-arroz/azevem
Outono-Inverno	2013	0-0-0	110-110-110	110-110-110
Primavera-Verão	2013/2014	150-70-120	150-70-120	20-110-120
Outono-Inverno	2014	0-0-0	130-130-130	130-130-130
Primavera-Verão	2014/2015	160-70-115	160-70-115	160-70-115
Outono-Inverno	2015	0-0-0	130-130-130	130-130-130
Primavera-Verão	2015/2016	150-70-120	150-70-120	0-105-80
Outono-Inverno	2016	0-0-0	130-130-130	130-130-130
Primavera-Verão	2016/2017	150-70-120	150-70-120	150-70-120
Total	-	610-280-475	1110-780-975	830-855-935

Fonte: Resultados originais da pesquisa, 2023/2024

Nota: O Azevém é pastejado com bovinos de corte; Sistema convencional (SC) = Pousio – arroz (com preparo de solo); SIPA = Azevém pastejado – arroz (semeadura direta); SIPA soja-arroz/azevém = Azevém pastejado – soja – azevém pastejado – arroz, com mínima mobilização do solo e semeadura direta. Fonte: Marcelo Ely, IRGA

Tabela 4 -Manejo da adubação de N, P₂O₅ e K₂O no ciclo 2 (2017 a 2020/2021), Fazenda Corticeiras, Cristal, RS

Estação	Ano / Safra	Dose de N-P ₂ O ₅ -K ₂ O aplicada (kg ha ⁻¹)		
		SC	SIPA	SIPA soja-arroz/azevem
Outono-Inverno	2017	0-0-0	150-120-75	150-120-75
Primavera-Verão	2017/2018	150-120-75	0-0-0	0-0-0
Outono-Inverno	2018	0-0-0	150-120-75	150-120-75
Primavera-Verão	2018/2019	150-115-75	0-0-0	0-0-0
Outono-Inverno	2019	0-0-0	150-115-90	150-115-90
Primavera-Verão	2019/2020	150-120-90	0-0-0	0-0-0
Outono-Inverno	2020	-	-	-
Primavera-Verão	2020/2021	-	-	-
Total até 2019/2020		450-355-240	450-355-240	450-355-240

Fonte: Resultados originais da pesquisa, 2023/2024

Nota: O Azevém é pastejado com bovinos de corte; Sistema convencional (SC) = Pousio – arroz (com preparo de solo); SIPA = Azevém pastejado – arroz (semeadura direta); SIPA soja-arroz/azevém = Azevém pastejado – soja – azevém pastejado – arroz, com mínima mobilização do solo e semeadura direta. Fonte: Marcelo Ely, IRGA

5.3 Manejo hibernar dos sistemas pré-coletas

Nos sistemas 2 a 5 no ano de 2019 foram semeados em 23/04/2019 20kg ha⁻¹ de azevém, 6,4kg ha⁻¹ de trevo e 8kg ha⁻¹ de cornichão. O ajuste de carga animal foi realizado contendo 3 animais por unidade experimental nos sistemas S2, S3 e S5 e 4 animais no S4, totalizando 39 animais na área experimental, sendo os animais colocados para pastejo dia 15/07/2019. No dia 30/07/2019 foram inseridos mais 16 animais, divididos entre S2 e S3, totalizando, portanto, 55 animais no experimento. Foi quantificado o ganho de peso dos animais em cada um dos sistemas, sendo o ganho médio de peso diário de 1000g em todos eles. A carga média animal era de 617kg no S2, 999kg no S3, 1363kg no S4 e 840kg no S5.

Os animais permaneceram nos sistemas até o momento da dessecação que foi realizada dia 17/09/2021. O S1 recebeu o preparo de solo de inverno próprio para o cultivo convencional do arroz.

5.4. Coletas das amostras para o estudo

Para condução do presente estudo, as amostras foram coletadas com auxílio de pá de corte, removendo-se o material orgânico superficial. A primeira coleta procedeu-se na primavera de 2019, logo após a saída do gado nos sistemas que continham o componente animal. Neste ano, a coleta foi realizada na profundidade 0-10 cm para as análises químicas e 0-0,05 m para as análises microbiológicas. A segunda coleta foi realizada no mesmo período da primeira, antes da entrada do arroz, porém, tanto para as análises químicas quanto microbiológicas foram coletadas amostras nas profundidades 0-0,10 m e 0,10 a 0,20 m. A safra 2020/2021 foi caracterizada pela entrada do arroz irrigado em todos os sistemas do protocolo experimental, a última coleta foi realizada após a colheita da cultura estival, objetivando-se conhecer as alterações provocadas pela inserção da cultura em todos os sistemas nos parâmetros avaliados, nesta ocasião as amostras novamente foram coletadas nas profundidades 0-0,10 m e 0,10-0,20 m.

O solo foi acondicionado em recipiente hermético com gelo e levado ao Laboratório de Microbiologia do Solo da FAEM-UFPeL, onde foi mantido sob refrigeração a aproximadamente 4 °C por até 7 dias até o momento da determinação.

As análises microbiológicas e químicas foram realizadas nos Laboratórios do Departamento de Solos da FAEM-UFPeL, no município de Capão do Leão/RS.

5.5. Condução das análises químicas

5.5.1. Teores dos macronutrientes N, P e K

Amostras recém coletadas foram utilizadas para determinação do N mineral, sendo retiradas alíquotas de cada sistema para conhecer a umidade no momento da análise. Para a investigação dos teores de P e K, parte da amostra coletada a campo foi seca ao ar e passada em peneira 2 mm. Para determinação do conteúdo de

nitrogênio mineral no solo (NH_4^+ e NO_3^-) e dos teores dos macronutrientes P e K utilizou-se a metodologia proposta por Tedesco et al. (1995).

5.5.2. Nitrogênio Potencialmente Mineralizável

O método da Destilação a Vapor Direta (DVD) foi utilizado para determinar o conteúdo de nitrogênio potencialmente mineralizável nos sistemas. Utilizou-se a metodologia proposta por Bushong et al. (2008) e Roberts et al. (2009). Pesou-se 1 g de amostra de solo seco e peneirado em malha 2 mm diretamente acondicionadas em tubo de digestão. Posteriormente, adicionou-se 10 mL da solução de NaOH (10 mol L^{-1}) nos tubos inseridos no destilador semimicro Kjeldahl. Após, 35 mL do destilado foram coletados em um becker contendo 5 mL da solução de ácido bórico mais indicadores. A quantificação do N-DVD foi feita através de titulação acidométrica com H_2SO_4 padronizado ($0,0025 \text{ mol L}^{-1}$).

5.6. Condução das análises microbiológicas

5.6.1. Carbono da biomassa microbiana do solo

Foram analisados os teores de C da biomassa microbiana pelo método de Irradiação-Extração, proposto por Ferreira (1998). Para o extermínio dos microrganismos foi utilizado o forno micro-ondas, em substituição ao clorofórmio. Amostras de 32 g de solo com umidade previamente determinadas foram retiradas de cada tratamento e acondicionadas em frascos “snap-cap” de 90 mL. As amostras sem tratamento de irradiação receberam 40 mL de solução K_2SO_4 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ e o outro grupo, destinado a irradiação da microbiota, passou pela esterilização por quatro minutos em forno micro-ondas e após receberam o mesmo volume de solução de K_2SO_4 . Todas amostras foram agitadas por 30 minutos, em agitador horizontal com 150 oscilações por minuto. Procedeu-se a centrifugação a 150 rpm por 3 minutos, e o sobrenadante foi pipetado para outro frasco. Da solução pipetada foi retirada uma alíquota de 25 mL para a determinação do carbono orgânico, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). Juntamente à pesagem das amostras, foram retiradas alíquotas para a determinação da umidade gravimétrica do solo no momento

da análise. Posteriormente estes dados foram utilizados para os cálculos. Os valores de carbono microbiano foram calculados de acordo com a Equação 1.

$$CM = \frac{C_i - C_{ni}}{K_c} \quad (1)$$

Onde:

CM: teor de carbono da biomassa microbiana do solo (mg kg^{-1});

C_i : teor de carbono da amostra irradiada (mg kg^{-1});

C_{ni} : teor de carbono da amostra não irradiada (mg kg^{-1});

K_c : 0,33 fator de correção proposto por Sparling & West (1988).

5.6.2 Nitrogênio da biomassa microbiana do solo

Assim como para o C, o nitrogênio da biomassa microbiana foi determinado a partir do método da Irradiação-Extração, conforme sugerido por Ferreira (1998). Amostras de 20 g de solo seco foram retiradas de cada tratamento, e foram acondicionadas em frascos “snap-cap” de 90 mL, as amostras após irradiação e as que não foram irradiadas, receberam 50 mL de solução K_2SO_4 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$. O nitrogênio da biomassa microbiana (N_{mic}) foi determinado de acordo com Brookes et al. (1985). Uma alíquota de 20 mL do extrato foi utilizada para a determinação do N total dos extratos irradiado e não-irradiado, determinado pelo método Kjeldahl, da seguinte forma: a alíquota foi transferida para um tubo de digestão na presença de 3 mL de H_2SO_4 concentrado e de 1 g de mistura catalítica (K_2SO_4 : CuSO_4 : Se, na relação 1: 0,1: 0,01). Os tubos foram instalados no bloco digestor onde realizou-se uma pré-digestão a 80°C por 14 horas, posteriormente a temperatura foi elevada a 150°C e mantida por uma hora e meia, sendo a digestão concluída elevando-se a temperatura a 300°C e mantendo-se assim por mais três horas. Imediatamente, realizou-se a destilação do N com adição de 20 mL de NaOH 400 g L^{-1} , recolhendo-se o destilado em erlenmeyer de 50 mL contendo 10 mL de H_3BO_3 (20 g L^{-1}), com indicador composto por verde de bromocresol e vermelho de metila, procedendo-se então a titulação com H_2SO_4 $0,0025 \text{ mol L}^{-1}$. O NM foi calculado de acordo com a Equação 2.

$$NM = (Ni - Nni) \times Kn \quad (2)$$

Onde:

NM: teor de nitrogênio da biomassa microbiana do solo (mg kg^{-1});

Ni: teor de nitrogênio da amostra irradiada (mg kg^{-1});

Nni: teor de nitrogênio da amostra não irradiada (mg kg^{-1});

Kn: 0,54 fator de correção proposto por Brookes et al. (1985).

5.7 Respiração basal do solo

A respiração basal do solo foi determinada pela quantificação do dióxido de carbono (CO_2) liberado no processo de respiração microbiana durante um período de incubação de 60 dias no ano de 2019 e por 7 dias nos anos de 2020 e 2021.

Assim que as amostras chegaram do campo foram retiradas subamostras de 100 g de solo juntamente com uma alíquota para determinação da umidade gravimétrica no momento da análise. Foram acondicionados em frascos de vidro com capacidade de 0,8 L, hermeticamente fechados. Cada frasco recebeu um tripé para sustentar um copo de polietileno de 50 mL contendo 20 mL de NaOH 1 M. O CO_2 liberado pela atividade microbiana foi captado pela solução de NaOH e medido através da titulação com solução de HCl 1 M após a adição de 5 mL de BaCl_2 (25%) e 3 gotas de fenolftaleína (1%).

Os frascos foram dispostos sobre a bancada do laboratório em um delineamento completamente casualizado. Foi utilizado um tratamento que compreende a prova em branco, ou seja, um frasco com ausência de solo e contendo apenas o copo com 20 mL de NaOH 1 mol L^{-1} . Os resultados foram calculados utilizando a Equação 3:

$$\text{mg C- CO}_2 \text{ 100 g}^{-1} \text{ solo} = (\text{VPB} - \text{VA}) \times \text{M ácido} \times \text{Eq. C- CO}_2 \times \text{FC} \quad (3)$$

Sendo:

VPB: volume de HCl gasto na prova em branco (mL);

VA: volume de HCl gasto na titulação do NaOH que recebeu o CO₂ desprendido do solos (mL);

Máximo: concentração de HCl 1M;

Eq. C- CO₂: equivalente grama do C- CO₂ = 6 g;

FC: fator de correção (concentração do ácido/concentração da base) = 1,0.

5.8 Atividade da enzima Urease

Para determinar a atividade da enzima urease nos solos, a ureia foi utilizada como substrato, em solução aquosa 0,2 mol L⁻¹. Foram pesados 5,0 g de solo, juntamente com a alíquota para determinação da umidade. As amostras foram acondicionadas em tubos Falcon (50 mL), juntamente com 9 mL de tampão THAM e, em seguida, 1 mL da solução de ureia. As amostras foram incubadas em uma incubadora Shaker com agitação orbital a temperatura de 37°C por duas horas. Após este período, foram adicionados 35 mL de solução refrigerada de KCl-Ag₂SO₄, a 4°C.

Em seguida, o volume foi ajustado para 50 mL, com a adição da mesma solução. Para cada amostra foi realizado um controle (prova em branco) onde não foi adicionado ureia antes da incubação visando determinar o N-NH₄ não derivado da ureia através da atividade da urease. Nestes controles apenas o tampão foi adicionado antes da incubação, sendo a ureia adicionada após a incubação, seguido do KCl-Ag₂SO₄.

Para determinar o NH₄⁺ foi empregada metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). Uma alíquota de 20 mL da suspensão foi transferida para um tubo de destilação de 100 mL, juntamente com 0,2 g de MgO calcinado. No condensador do destilador, foi posicionado um erlenmeyer de 50 mL contendo 5,0 mL de indicador ácido bórico. A destilação foi encerrada depois de recolhido cerca de 40 mL de destilado.

A titulação foi realizada com H₂SO₄ padronizado com molaridade em cerca de 0,0025 mol L⁻¹. O mesmo procedimento foi adotado para a obtenção de três provas em branco, utilizando 20 mL da solução de KCl-Ag₂SO₄.

A concentração de amônio foi obtida a partir da seguinte expressão (Equação 4):

$$\text{NH}_4 \text{ (mg kg}^{-1}\text{)} = \frac{(\text{mL H}^+_{\text{am}} - \text{mL H}^+_{\text{br}}) \times 70 \times 2,5}{\text{g de solo}} \quad (4)$$

Onde: H^+_{am} e H^+_{br} são as quantidades de ácido gasto na titulação da amostra e do controle, respectivamente.

A atividade da enzima urease foi expressa em $\text{mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ solo } 2\text{h}^{-1}$.

5.9 Atividade enzimática total do solo por Hidrólise do Diacetado de Fluorescína (FDA)

Para a determinação da FDA foi utilizada a metodologia proposta por Adam e Duncan (2011) com modificações propostas por Scholles, de Sá, Camargo e Selbach (Biologia do solo, UFRGS).

Foram pesados 2 g de solo úmido referente a cada amostra em tubos Falcon. Assim como para as demais análises, foram retiradas alíquotas de cada amostra para determinação da umidade do solo no momento da análise. Posteriormente foi adicionado 15 mL de solução tampão fosfato (60 nM a pH 7,6) e 0,2 mL da solução estoque de FDA ($1000 \mu\text{g mL}^{-1}$). Os tubos foram tampados e incubados em incubadora Shaker com agitação orbital de 110 rpm e 30 °C por 20 minutos. Após este período foi adicionado 0,2 mL de clorofórmio PA para que fossem interrompidas as reações. As amostras foram centrifugadas a 2000 rpm durante 3 minutos e os sobrenadantes obtidos foram filtrados em papel de filtro Whatman® nº 42. As mensurações da absorção foram feitas em espectrofotômetro a 490nm.

Calculou-se o teor de fluoresceína liberado com o auxílio de uma curva padrão de 0 a 20 $\mu\text{g mL}^{-1}$ de fluoresceína. Os resultados foram expressos em $\mu\text{g FDA g solo } 1 \text{ h}^{-1}$.

5.10. Análises estatísticas dos dados

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software WinStat® versão 1.0 e SigmaPlot® versão 12.5. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), através da análise de modelos lineares, sendo avaliado o fator qualitativo sistemas de produção (S1 a S5) dentro dos blocos para cada uma das profundidades de coleta. As variáveis com efeito significativo destinaram-se ao teste de comparação de médias Tukey, a 5% de probabilidade de erro.

Foi realizada a análise de componentes principais (ACP) e o Coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis químicas e microbiológicas. A análise foi aplicada de acordo com Hair Junior et al. (2009), com o intuito de avaliar quais variáveis causam maior variabilidade nos tratamentos; investigar as similaridades entre os tratamentos; e as inter-relações entre as variáveis. Para a realização destas análises foi utilizado o programa computacional R-Project (R Core Team, 2020). De modo que atendesse ao pressuposto da análise, foram atribuídos valores de 1 a 10 para os componentes representando, portanto, cada um dos 5 sistemas nas duas profundidades. Sendo PC 1 o sistema 1 na profundidade 0-0,10 m e PC 6 o sistema 1 na profundidade 0,10-0,20 m.

6. Resultados

6.1. Parâmetros microbiológicos de qualidade do solo

6.1.1. Atividade microbiana através da Respiração Basal do solo

O primeiro parâmetro determinado após a coleta de solo foi a respiração basal do solo, a partir da quantificação do conteúdo de CO₂ liberado por cada sistema durante um período de incubação. Em 2019, primeiro ano de coleta, a incubação durou 7 dias, assim como nos demais anos, porém neste ano a coleta de solo foi realizada apenas na profundidade 0-0,5 m e não foram observados efeitos significativos dos diferentes sistemas na liberação de CO₂, tendo as emissões variado entre 0,25 (S2) e 0,14 (S1) mg CO₂ g solo-1 7 dias-1 (Figura 4).

Nos anos de 2020 e 2021, apesar de não terem sido constatadas diferenças significativas entre os sistemas de integração agropecuária, observa-se diferença entre as duas profundidades de coleta avaliadas no mesmo sistema de integração, evidenciando que a maior atividade microbiana se concentra na camada superior do solo (0-0,10 m) em ambos os anos.

Para o primeiro ano, as emissões variaram entre 0,22 (S2) e 0,10 (S3) mg CO₂ g solo-1 7 dias-1 na profundidade 0-0,10 m e entre 0,06 (S5) e 0,02 (S3) mg CO₂ g solo-1 7 dias-1 na profundidade 0,10-0,20 m (Figura 5). No último ano coletado detectou-se emissões de 0,18 (S5) a 0,08 (S1) mg CO₂ g solo-1 7 dias-1 na camada superior do solo e 0,06 (S4 e S5) a 0,04 (S1 e S2) mg CO₂ g solo-1 7 dias-1 na camada abaixo (Figura 6).

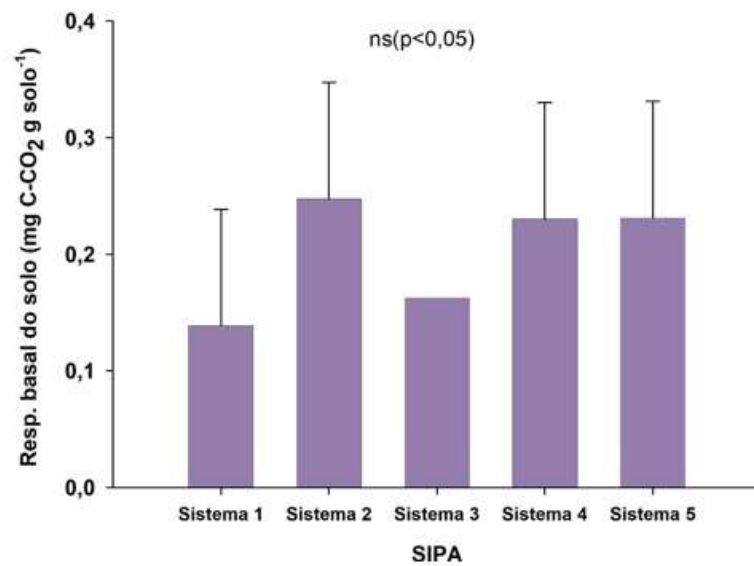


Figura 4 -Respiração basal do solo oriunda de diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas no ano de 2019. Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão da amostra. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade
Fonte: Resultado original da pesquisa

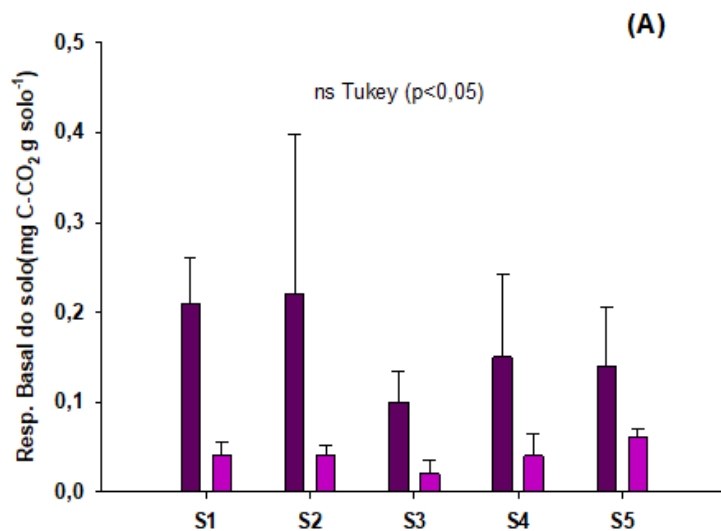


Figura 5- Respiração basal do solo oriunda de diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: não diferiu pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Barras ver
Fonte: Resultado original da pesquisa

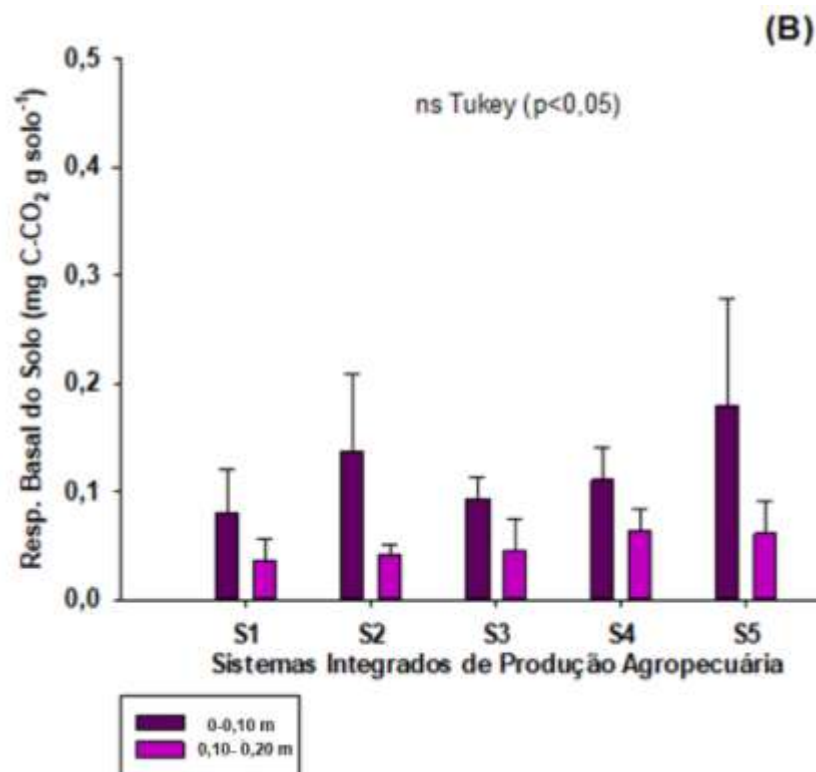


Figura 6 - Respiração basal do solo oriunda de diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de e 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: não diferiu pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Barras verticais indicam o desvio padrão da amostra. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade

Fonte: Resultados originais da pesquisa

6.1.2. Carbono da Biomassa microbiana (CBM)

A biomassa microbiana quantificada a partir do teor de carbono presente na estrutura dos microrganismos não foi alterada pelo sistema de produção no manejo consolidado até o ano de 2019, tendo a ANOVA não apresentado significância para este parâmetro. Neste ano, o estoque de CBM variou entre 280,6 mg kg⁻¹, encontrado no sistema 2 (S2) e 143,9 mg kg⁻¹ na testemunha (S1) (Figura 7).

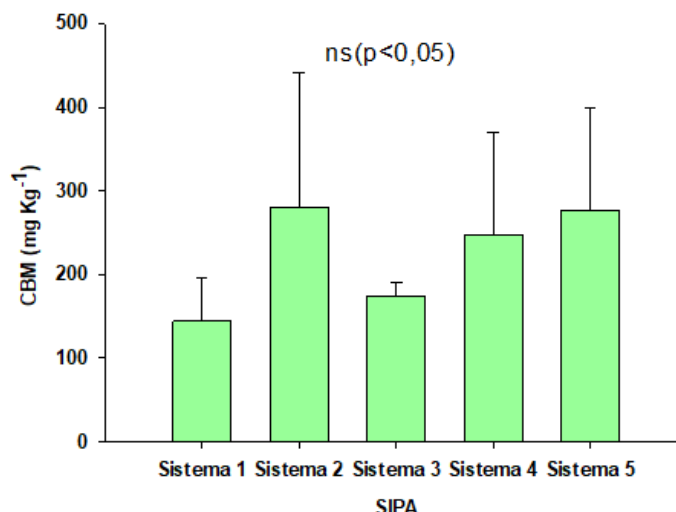


Figura 7 - Carbono da Biomassa Microbiana do solo (CBM) em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas no ano de 2019. Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão da amostra. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade
Fonte: Resultado original da pesquisa

Na coleta realizada antes da semeadura do arroz em todos os sistemas (2020) notou-se efeito da profundidade para o conteúdo de carbono da biomassa microbiana, novamente destacando a relevância da camada superior do solo para a atividade dos microrganismos. Porém, entre os sistemas integrados não houve significância estatística quando submetidos à análise da variância. O C microbiano na profundidade 0-10 cm variou entre 196,8 mg kg⁻¹ e 121,7 mg kg⁻¹, conteúdo encontrado nos sistemas 5 e 2, respectivamente.

Na camada 0,10-0,20 m o estoque de C microbiano variou entre 138,5 mg kg⁻¹ (S5) e 61,9 mg kg⁻¹ (S3). Após a colheita do arroz irrigado (2021) não foi observado nem efeito do sistema nem da profundidade de coleta no conteúdo de carbono da biomassa microbiana do solo. Na coleta final o sistema 2 apresentou o maior estoque de CBM (257,3 mg kg⁻¹) e o sistema 3 o menor (83,9 mg kg⁻¹) na camada 0-0,10 m, na camada inferior foram quantificados de 129,4 mg kg⁻¹ no sistema 3 a 85,8 mg kg⁻¹ na testemunha (Figura 8 e 9).

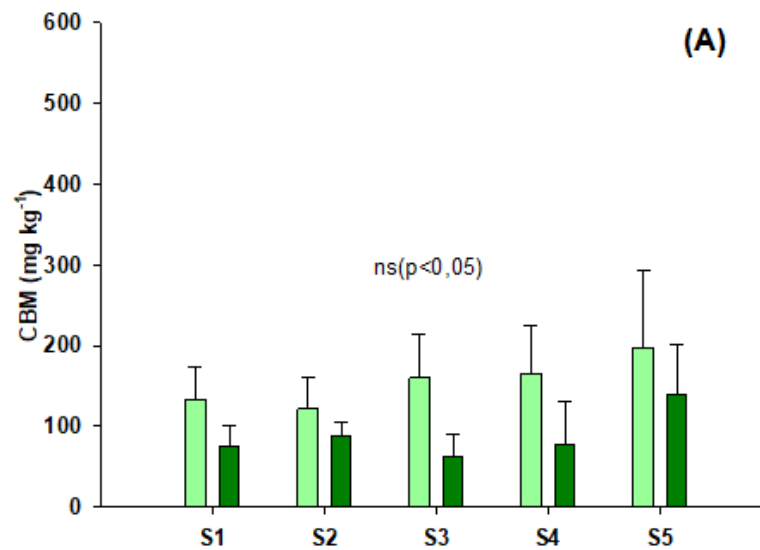


Figura 8 - Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam desvio padrão. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade
Fonte: Resultados originais da pesquisa

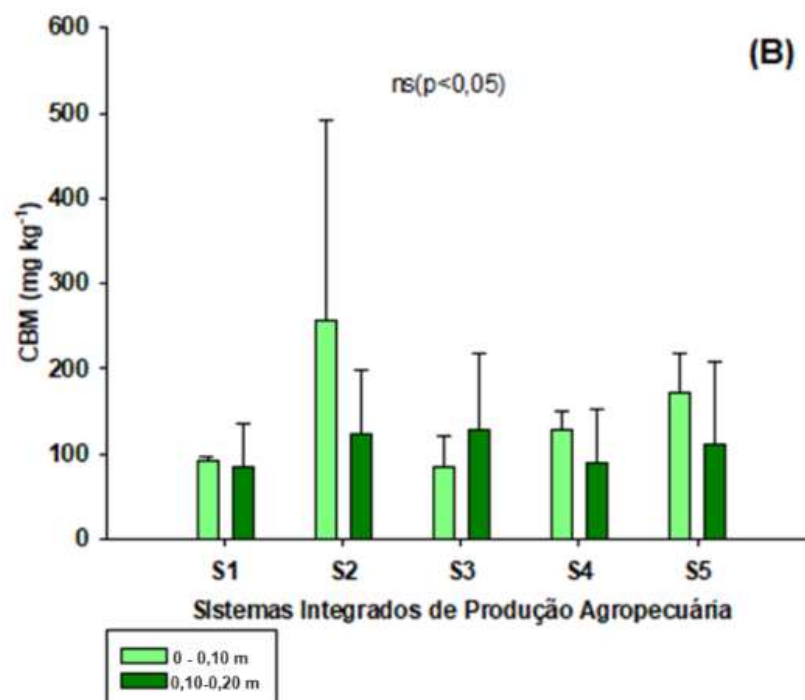


Figura 9 -Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam desvio padrão. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade
Fonte: Dados originais da pesquisa

6.1.3. Nitrogênio da Biomassa microbiana (NBM)

A determinação do N microbiano foi efetuada apenas nas coletas 2020 e 2021. No primeiro ano constatou-se significância estatística apenas para a profundidade de coleta, sendo o maior conteúdo de nitrogênio da biomassa microbiana encontrado na camada 0-0,10 m, onde variou de 59,7 mg kg⁻¹ a 21,0 mg kg⁻¹ no sistema 4 e na testemunha (S1), respectivamente. Estoques menores de NM foram observados na camada inferior para o mesmo ano, variando entre 21,5 mg kg⁻¹ no sistema 5 e 7,5 mg kg⁻¹ na testemunha (S1).

No segundo ano de avaliação do parâmetro, ou seja, após o cultivo de arroz a ANOVA não demonstrou significância para os fatores submetidos.

Nota-se, porém, observando os gráficos que o conteúdo de nitrogênio da biomassa microbiana nos sistemas diminuiu drasticamente se compararmos a época de coleta, sendo a reserva de N microbiano reduzida após o cultivo de arroz. Na profundidade 0-0,10 m os teores de N microbiano variaram entre 8,3 e 5,2 mg kg⁻¹ nos sistemas S4 e S3, respectivamente. Pouca variação no NBM foi observada na camada abaixo, onde foi encontrado o maior estoque no sistema 3 (7,9 mg kg⁻¹) e o menor na testemunha (5,5 mg kg⁻¹) (Figura 10 e 11).

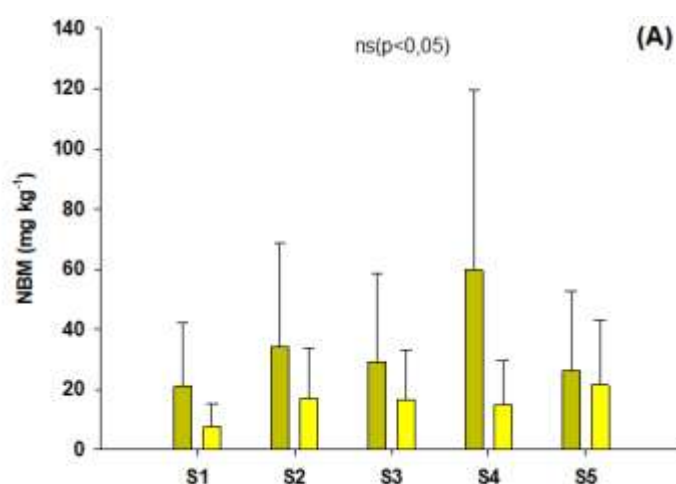


Figura 10 - Nitrogênio da Biomassa Microbiana (NBM) em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam desvio padrão. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade

Fonte: Resultados originais da pesquisa

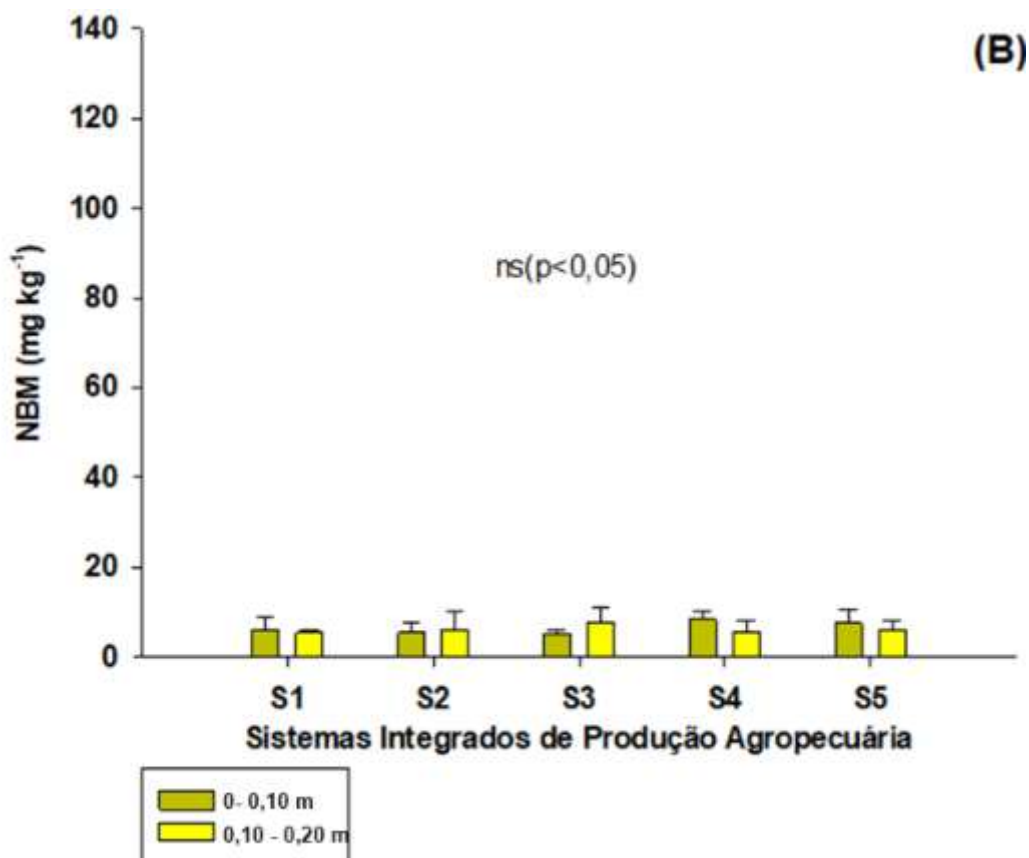


Figura 11- Nitrogênio da Biomassa Microbiana (NBM) em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam desvio padrão. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade
Fonte: Resultados originais da pesquisa

6.1.4. Atividade de enzimas extracelulares

A atividade enzimática total do solo foi quantificada a partir da Hidrólise do Diacetato de fluoresceína (FDA) nos anos 2020 e 2021. No primeiro ano avaliado encontraram-se diferenças significativas entre os tratamentos na profundidade 0-0,10cm, além da superioridade evidente desta camada quando comparada à inferior. O sistema 5 (S5) apresentou 14,29 μg de FDA $\text{g solo}^{-1} \text{ hora}^{-1}$ e, apesar de diferir significativamente apenas do sistema 2 (5,12 μg de FDA $\text{g solo}^{-1} \text{ hora}^{-1}$), apresenta leve superioridade em relação aos demais para esta variável.

Por outro lado, de acordo com o teste de médias ele não diferiu da testemunha (S1), indicando que outros fatores além da rotação de culturas podem afetar a atividade enzimática do solo. Na profundidade 10-20 cm um resultado inesperado foi observado, a atividade enzimática total do solo variou entre 7,32 μg de FDA g solo^{-1}

hora⁻¹ na testemunha e 1,77 µg de FDA g solo⁻¹ hora⁻¹ no sistema 2. Após a colheita do arroz irrigado apenas a profundidade foi a variável qualitativa significativa, demonstrando mais uma vez a importância da estratificação das camadas do solo para a análise microbiológica. A atividade enzimática oscilou entre 47,9 µg de FDA g solo⁻¹ hora⁻¹ (sistema 2) e 23,7 µg de FDA g solo⁻¹ hora⁻¹ (sistema 5) na profundidade 0-10 cm, já na camada inferior foram detectados menores valores, onde a amplitude não passou dos 18,8 µg de FDA g solo⁻¹ hora⁻¹ no sistema 5 e 10,4 µg de FDA g solo⁻¹ hora⁻¹ no sistema 2. (Figura 12 e 13).

Outro importante indicativo da qualidade dos solos arrozeiros é a presença da enzima urease. A atividade desta enzima foi quantificada a partir do NH₄⁺ liberado pela hidrólise da ureia como substrato nas coletas de 2020 e 2021 e para ambos os anos foi constatada influência dos sistemas integrados nos resultados.

Em 2020 observa-se superioridade das amostras coletadas na camada superior do solo, além disso o sistema de rotação com baixa diversidade (S5) apresentou maior conteúdo de NH₄⁺ oriundo da atividade da urease em relação aos sistemas 1 e 3 (S1 e S3), não diferindo significativamente dos demais, neste caso a maior atividade da enzima urease foi detectada no tratamento 5 (53,0 mg NH₄⁺ g solo⁻¹ 2 horas⁻¹) e a menor no sistema 3 (20,9 mg NH₄⁺ g solo⁻¹ 2 horas⁻¹). Na camada 10-20 cm a produção de amônio derivado da atividade da urease não ultrapassou 20,9 mg NH₄⁺ g solo⁻¹ 2 horas⁻¹ (sistema 5), sendo o menor valor (8,7 mg NH₄⁺ g solo⁻¹ 2 horas⁻¹) observado na testemunha. Valores muito inferiores ao ano anterior foram observados na coleta após o cultivo do arroz irrigado (2021), neste caso os sistemas 4 e 5 (S4 e S5) na profundidade 0-0,10 m apresentaram produção de amônio derivado da urease superior aos demais tratamentos, 13,2 e 13,3 mg NH₄⁺ g solo⁻¹ 2 horas⁻¹, respectivamente. Enquanto na profundidade 0,10-0,20 m não foi detectada presença de NH₄⁺ oriunda deste processo (Figura 14 e 15).

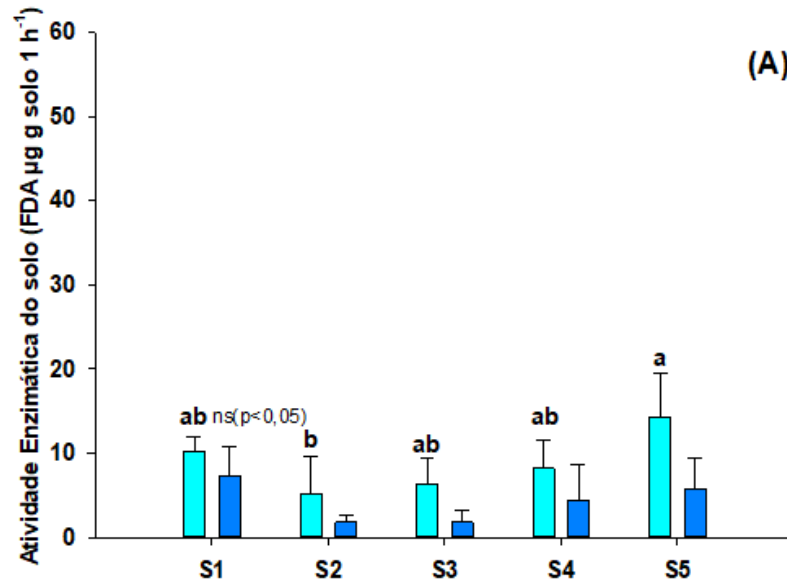


Figura 12 - Atividade enzimática do solo pelo método de FDA em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. Tukey ($p < 0,05$). S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade
Fonte: Resultados originais da pesquisa

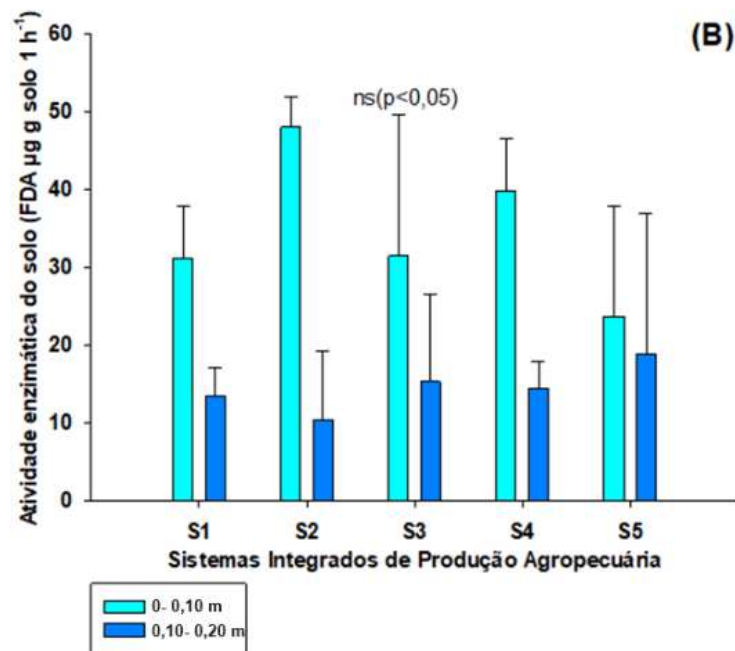


Figura 13 - Atividade enzimática do solo pelo método de FDA em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. Tukey ($p < 0,05$). S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade
Fonte: Resultados originais da pesquisa

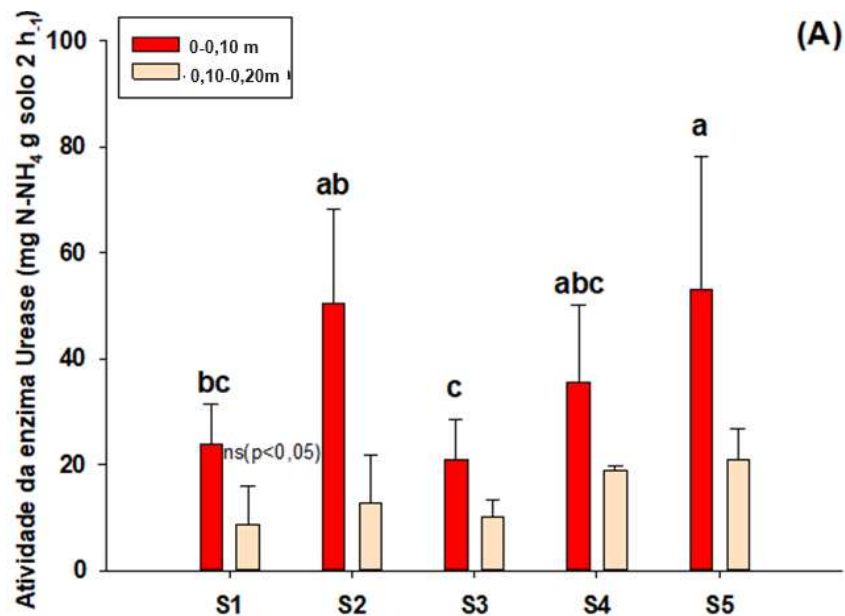


Figura 14 - Atividade da enzima urease em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si. Tukey ($p < 0,05$). S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade

Fonte: Resultados originais da pesquisa

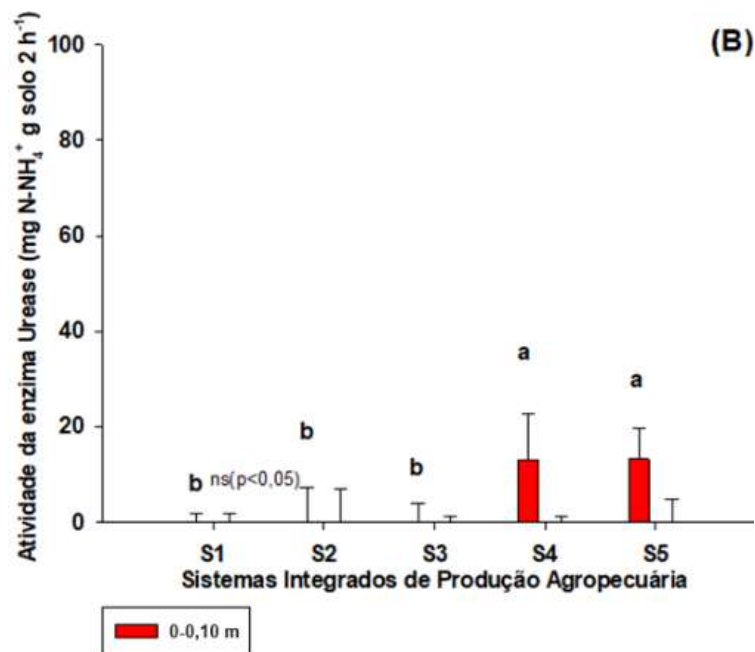


Figura 15 - Atividade da enzima urease em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam desvio padrão. Médias se

Fonte: Resultados originais da pesquisa

6.2. Parâmetros químicos de qualidade do solo

6.2.1. Nitrogênio Mineral do solo

O conteúdo de N mineral no solo na forma de NH_4^+ não foi significativo para a análise da variância em nenhum dos anos avaliados, para ambas profundidades (Figura 16 e 17). Porém, nota-se uma grande diminuição do conteúdo de amônio em todos os sistemas após o cultivo do arroz irrigado. No ano de 2020 o sistema 5 continha o maior teor de nitrogênio na forma de amônio ($19,5 \text{ mg kg}^{-1}$) por outro lado a testemunha apresentou o menor valor de NH_4^+ entre os sistemas avaliados ($2,2 \text{ mg kg}^{-1}$) na profundidade 0-0,10 m., porém, na camada inferior a testemunha apresentava a maior concentração ($9,4 \text{ mg kg}^{-1}$), praticamente o dobro da encontrada no sistema 2 ($4,6 \text{ mg kg}^{-1}$), o menor conteúdo de amônio nesta profundidade e ano. Após o cultivo do arroz, a concentração de N- NH_4^+ manteve-se entre $5,5 \text{ mg kg}^{-1}$ (S2) e $1,4 \text{ mg kg}^{-1}$ (S4) na camada 0-0,10 m e $3,9 \text{ mg kg}^{-1}$ (S5) e $1,1 \text{ mg kg}^{-1}$ (S2) na camada 0,10-0,20m.

Por outro lado, o N na forma de NO_3^- (Figura 18 e 19), além de apresentar teores maiores em relação ao NH_4^+ , apresentou diferenças entre os tratamentos no ano de 2020, tendo o sistema 4 (S4) o maior conteúdo de nitrato na profundidade 0-0,10 m ($83,3 \text{ mg kg}^{-1}$) frente ao menor, encontrado na testemunha ($2,9 \text{ mg kg}^{-1}$). Para a profundidade 0,10-0,20 m não foram observadas diferenças entre os sistemas antes do cultivo do arroz (2020) e as concentrações variaram de $17,6 \text{ mg kg}^{-1}$ nos sistemas 5 a $6,2 \text{ mg kg}^{-1}$ na testemunha. Nas amostras coletadas após o cultivo do arroz, além de uma drástica redução dos teores de NO_3^- não foi constatada diferenças significativas para os sistemas. Na camada 0-0,10 m os teores de nitrato estavam entre $10,7 \text{ mg kg}^{-1}$ (S2) e $5,8 \text{ mg kg}^{-1}$ (S3) e $5,1 \text{ mg kg}^{-1}$ (S4) e $3,5 \text{ mg kg}^{-1}$ (S5) na camada 0,10-0,20 m.

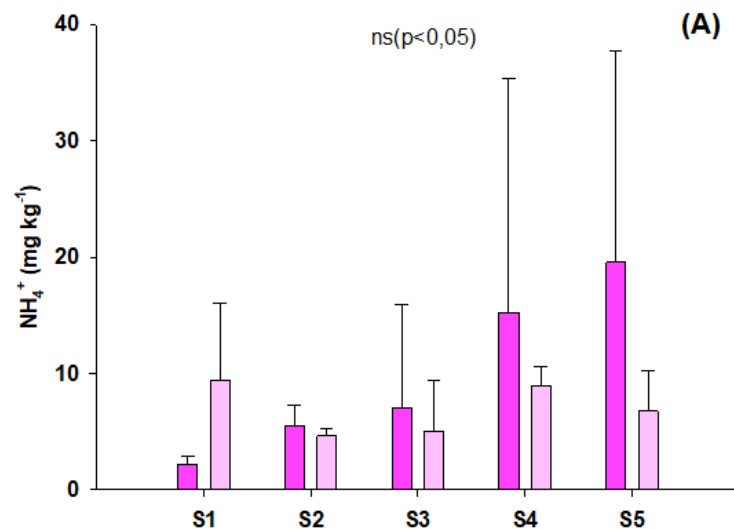


Figura 16 - Teor de N mineral na forma de NH_4^+ em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade
Fonte: Resultados originais da pesquisa

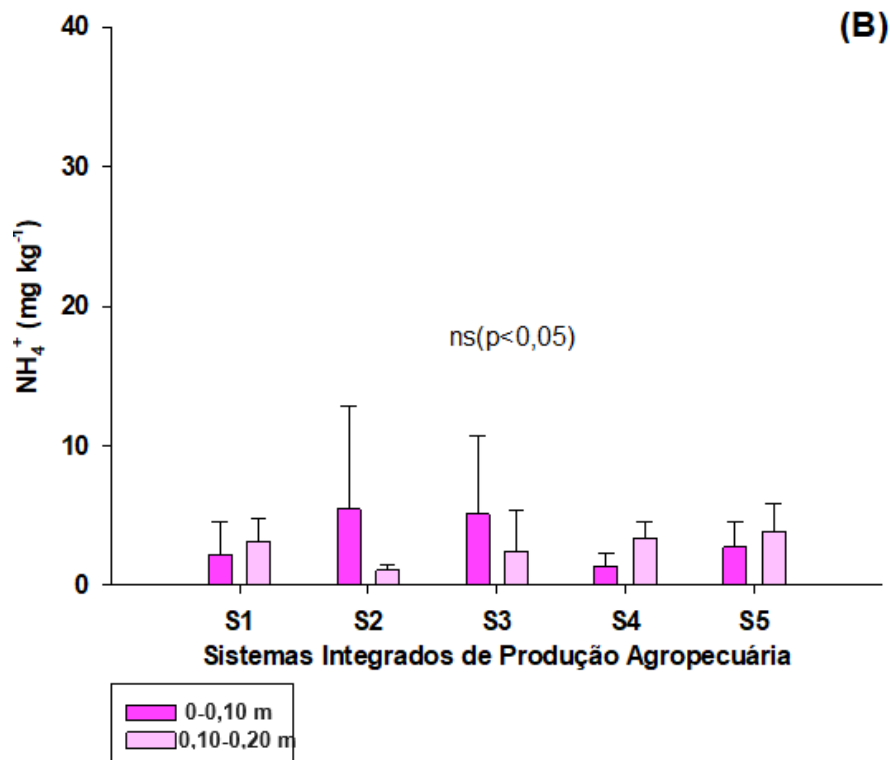


Figura 17 - Teor de N mineral na forma de NH_4^+ em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade
Fonte: Resultados originais da pesquisa

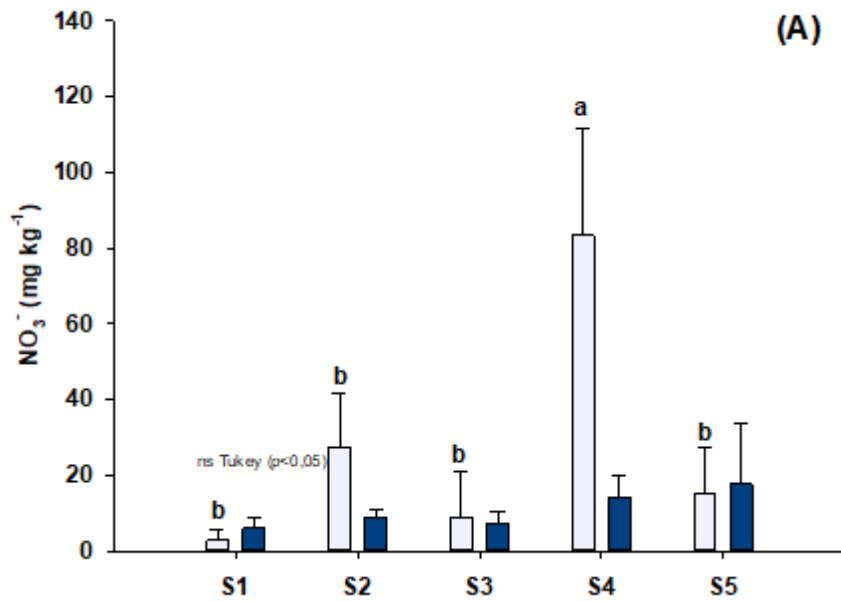


Figura 18- Teor de N mineral na forma de NO₃⁻ em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si. Tukey (p<0,05). S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade

Fonte: Resultados originais da pesquisa

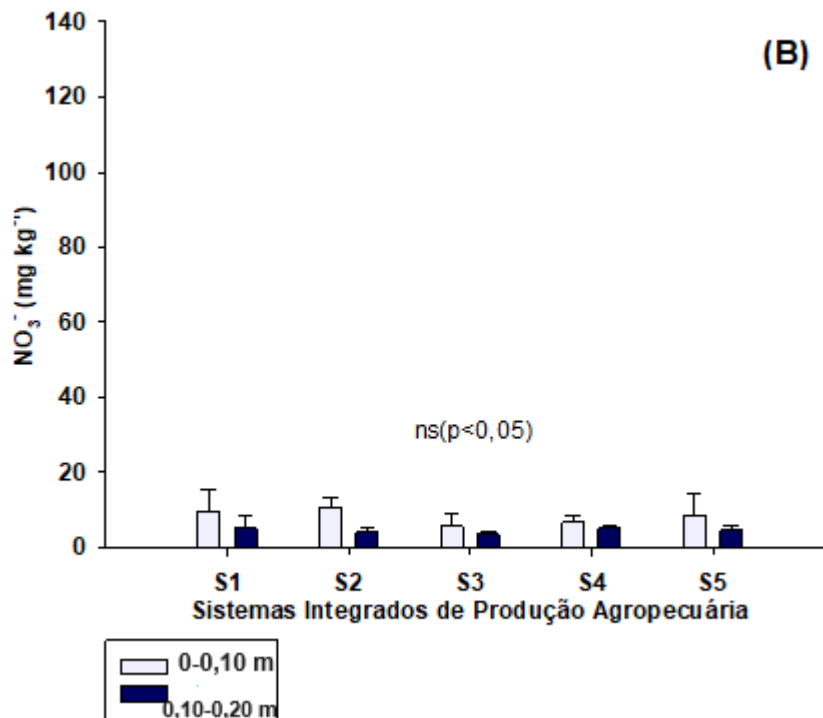


Figura 19 - Teor de N mineral na forma de NO₃⁻ em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra não

diferem entre si. Tukey ($p < 0,05$). S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade

Fonte: Resultados originais da pesquisa

6.2.2. Nitrogênio potencialmente mineralizável

A partir do método destilação a vapor direta (N-DVD) foi possível estimar o teor de N potencialmente mineralizável para a cultura do arroz (Figuras 20 e 21), sendo as amostragens para esta análise realizadas nas coletas de 2020 e 2021. Em ambos os anos houveram efeitos significativos da adoção de rotação de culturas e inserção do componente animal no sistema de produção. Na primeira coleta os teores de N-DVD foram superiores na primeira camada. Os sistemas com rotação de alta diversidade (S4) e baixa diversidade (S5) apresentam conteúdos de N potencialmente mineralizável superiores ao sistema representativo ao monocultivo de arroz (S1). Por outro lado, os sistemas com rotação de moderada diversidade (S3) e apenas sucessão de baixa diversidade (S2) não diferiram da testemunha (S1) quanto ao teor de N potencialmente mineralizável. Após a colheita do arroz apesar de não ter havido grandes mudanças nos teores em relação à coleta pré-plantio, o teste de média não apontou diferenças significativas entre os cinco sistemas investigados.

No ano de 2020 a estimativa de N potencialmente mineralizável na camada 0-0,10 m do solo variou entre 265,3 mg kg⁻¹ no sistema 5 e 125,3 mg kg⁻¹ na testemunha, já na camada 0,10-0,20 m estimou-se 132,3 mg kg⁻¹ no sistema 5, compreendendo o maior conteúdo para esta profundidade, e 101,0 mg kg⁻¹ no sistema 3 com o menor conteúdo de N potencialmente mineralizável pelo método da destilação a vapor direta.

Na camada superior do solo após o cultivo de arroz irrigado a estimativa de N potencialmente mineralizável oscilou entre 204,9 mg kg⁻¹ (S2) e 135,5 mg kg⁻¹ (S1), enquanto na porção logo abaixo esses valores reduziram para 169,9 mg kg⁻¹ (S5) e 105,7 mg kg⁻¹ (S4).

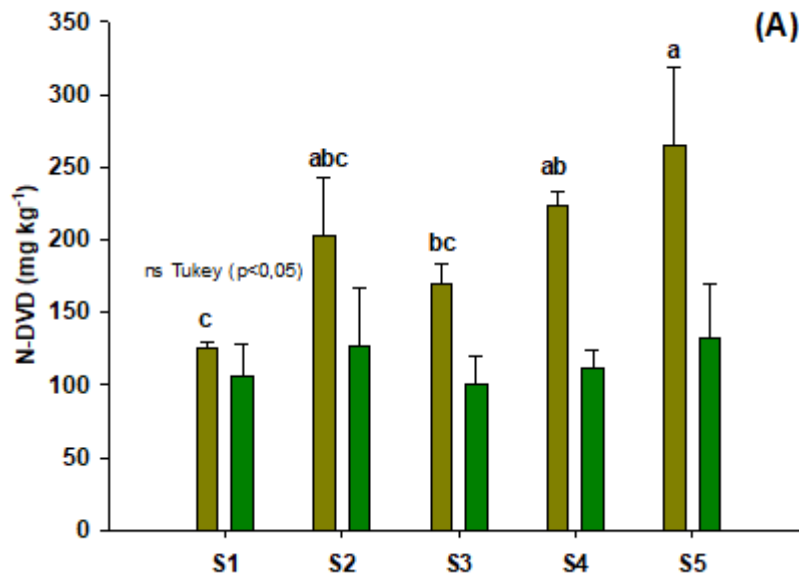


Figura 20 - Teor de N potencialmente mineralizável estimado pelo método da Destilação a Vapor Direta (N-DVD) em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si. Tukey ($p<0,05$). S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade
Fonte: Resultados originais da pesquisa

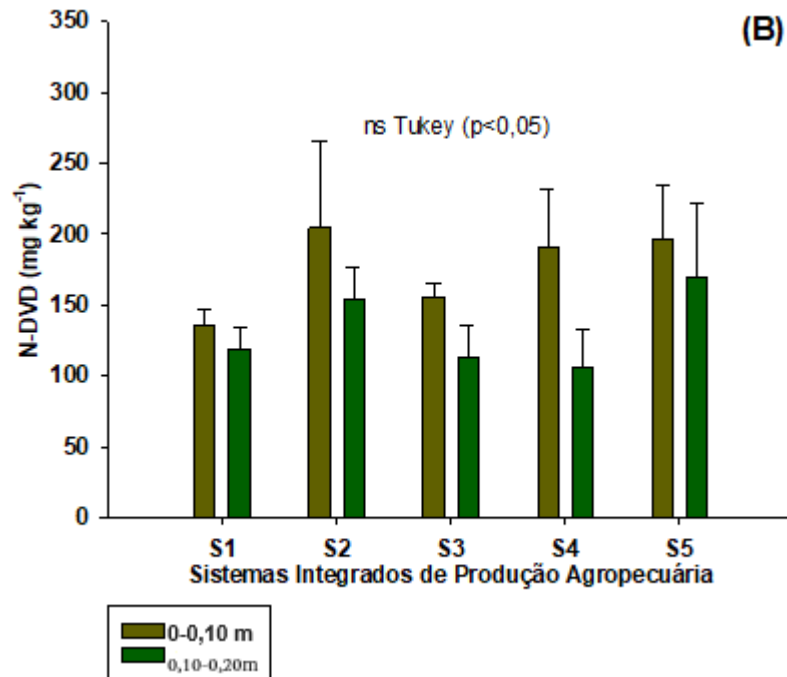


Figura 21- Teor de N potencialmente mineralizável estimado pelo método da Destilação a Vapor Direta (N-DVD) em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si. Tukey ($p<0,05$). S1 –

testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade
 Fonte: Resultados originais da pesquisa

6.2.3. Teores dos macronutrientes P e K

As determinações das concentrações de fósforo e potássio foram realizadas nas três coletas. Em 2019 não houve efeito significativo dos sistemas sobre os teores de P e K na profundidade coletada (0-0,10 cm), conforme apresentado na Figura 22. O teor de P variou entre 37,3 e 14,4 mg kg⁻¹ nos sistemas 4 e testemunha, respectivamente. Já os teores de K oscilaram entre 73,5 e 48,6 mg kg⁻¹, nos sistemas 2 e 5, na devida ordem.

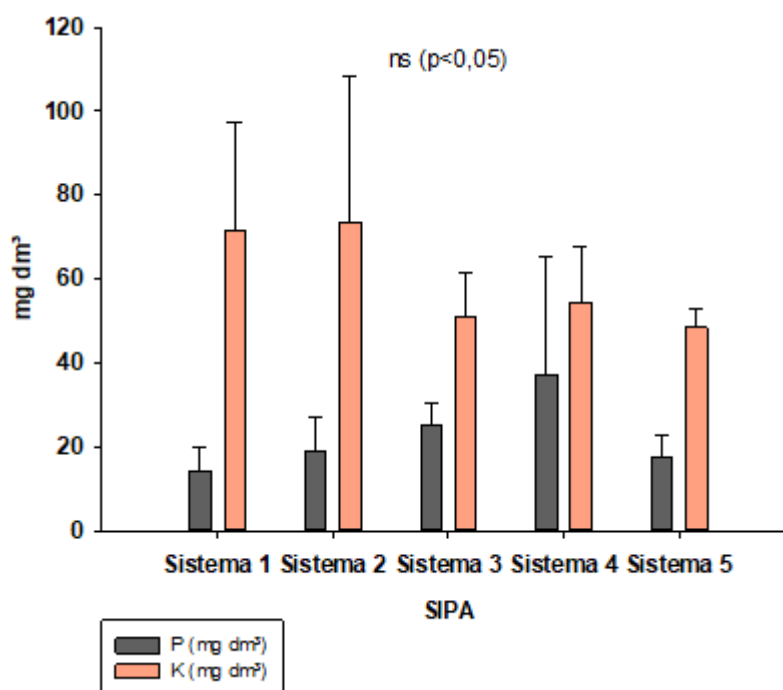


Figura 22 - Concentração de fósforo (P) e potássio (K) extraídos por Melich-1 em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas no ano de 2019. Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão da amostra. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade
 Fonte: Resultados originais da pesquisa

Em 2020 os teores de fósforo nos sistemas diferiam-se entre si na profundidade 0-0,10 m. Neste caso, os sistemas 4 e 5 (S4 e S5) superavam a testemunha na concentração de P disponível, sendo o maior teor encontrado no S4, 82,0 mg kg⁻¹, em oposição aos 11,1 mg kg⁻¹ observados no S1. Os sistemas 2 e 3 (S2 e S3) não

apresentaram diferenças em relação ao teor de fósforo disponível no momento da coleta. Na profundidade 0,10-0,20 m não foram detectadas influências do sistema produtivo no teor do nutriente e os teores variaram entre 12,5 mg kg⁻¹ (S4) e 8,7 mg kg⁻¹ (S5). Apesar de haver maior concentração de P disponível na camada superior do solo na coleta realizada após a colheita do arroz, não foi constada influência dos sistemas no teor do elemento em nenhuma das camadas. Nesta ocasião, a camada 0-0,10 m apresentou concentrações de P entre 34,0 mg kg⁻¹ (S5) e 14,7 mg kg⁻¹ (S1) e a camada logo abaixo detinha os teores do nutriente alternando entre 18,4 mg kg⁻¹ (S3) e 10,8 mg kg⁻¹ (S5 e S2) (Figura 23 e 24).

O teor de K disponível não foi afetado significativamente pelos diferentes sistemas investigados, em nenhuma das épocas e profundidades de coleta, porém, aferiu-se variações nestes teores. Na segunda época de coleta (2020) os teores do cátion variaram entre 74,5 mg kg⁻¹ (S4) e 55,9 mg kg⁻¹ (S1) na primeira camada e 28,9 mg kg⁻¹ (S2) e 12,4 mg kg⁻¹ (S1) na camada imediatamente inferior. Na terceira época (2021) foram verificados valores entre 77,1 mg kg⁻¹ de K na testemunha e 28,1 mg kg⁻¹ na sistema 4, na camada 0-10 cm e 26,8 mg kg⁻¹ (S4) e 9,5 (S3) na camada 0,10-0,20 m (Figura 25 e 26).

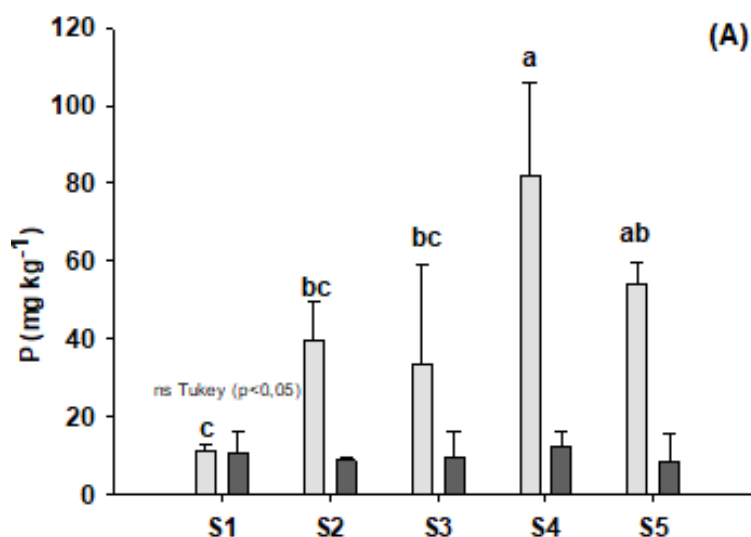


Figura 23 - Teor de P extraído por Melich-1 em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si. Tukey ($p < 0,05$). S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade

Fonte: Resultados originais da pesquisa

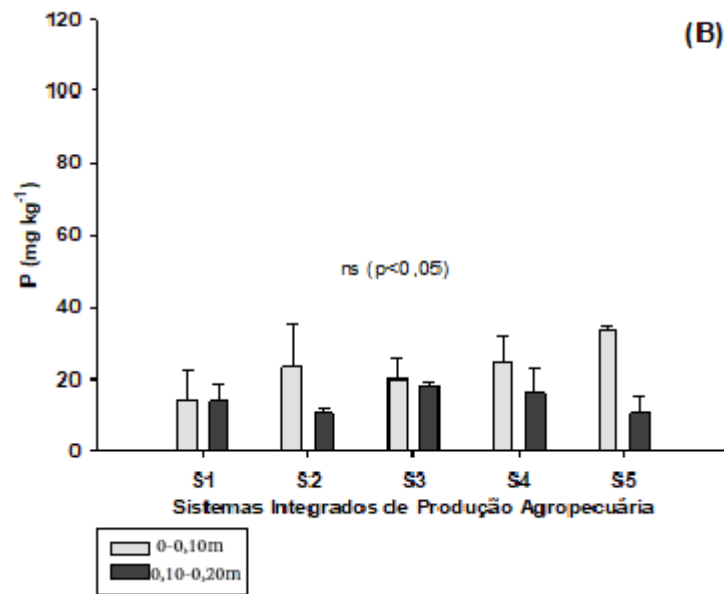


Figura 24 - Teor de P extraído por Melich-1 em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si. Tukey ($p < 0,05$). S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade

Fonte: Resultados originais da pesquisa

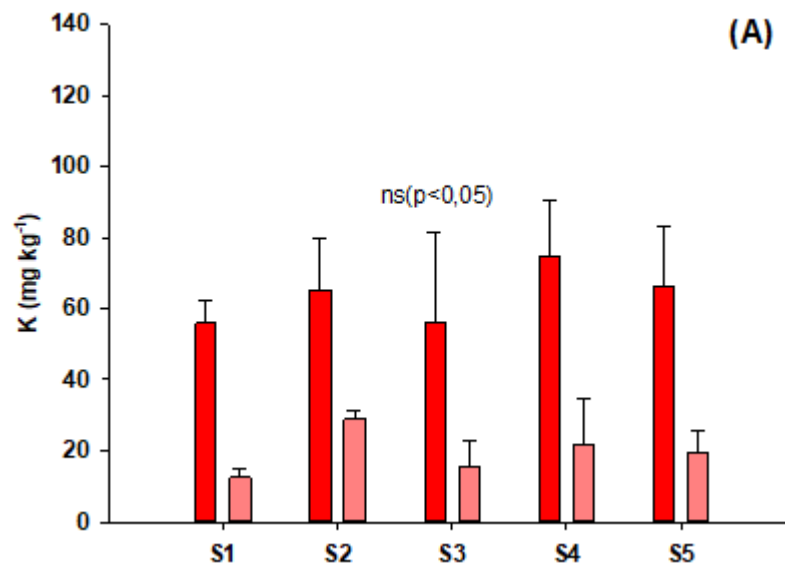


Figura 25- Teor de K extraído por Melich-1 em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2020 (A). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade

Fonte: Resultados originais da pesquisa

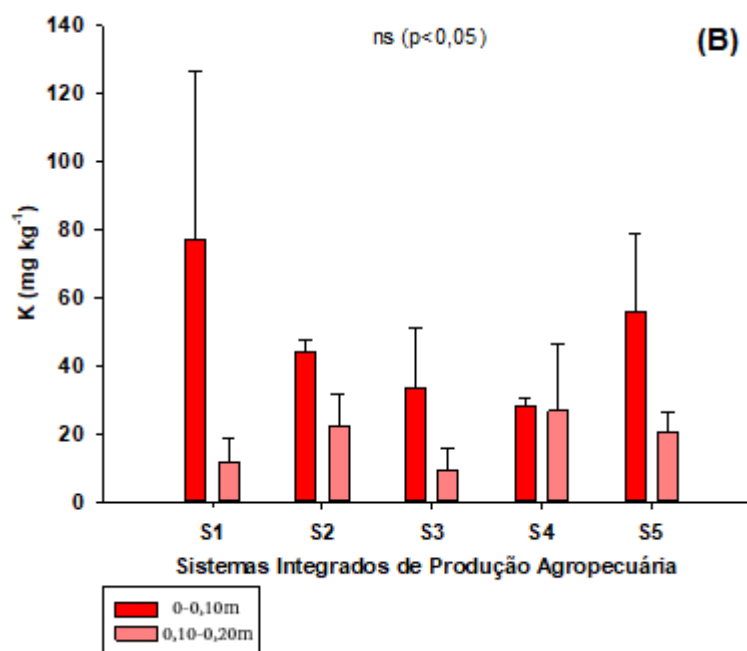


Figura 26 - Teor de K extraído por Melich-1 em diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) em terras baixas nos anos de 2021(B). Cristal, Rio Grande do Sul, Brasil. ns: sem significância estatística. Barras verticais indicam o desvio padrão. S1 – testemunha (arroz-pousio, sem presença animal); S2 – sucessão com baixa diversidade; S3 – rotação com moderada diversidade; S4 - rotação com alta diversidade; S5 – Rotação com baixa diversidade
Fonte: Resultados originais da pesquisa

6.3. Análise de Componentes Principais para os parâmetros químicos e microbiológicos

Para o ano de 2020 deve-se analisar em primeiro momento o percentual de variância explicada por cada uma das componentes principais geradas. Na tabela 5 podemos verificar que o componente 1 explica 67.57% da variabilidade dos dados e o componente 2 explica 13.36% da variabilidade dos dados, sendo assim, a proporção acumulativa de variância explicada pelos dois primeiros componentes principais é 80.93%.

Portanto, os dois primeiros componentes conseguem obter uma boa caracterização da variabilidade do conjunto de dados.

Tabela 5 - Importância dos componentes

PC	Eigenvalue	Variance (%)	Acumulative (%)
1	2,59	67,57	67,57
2	1,15	13,36	80,93
3	1,07	11,62	92,55
4	0,61	3,68	96,23
5	0,49	2,45	98,68
6	0,33	1,08	99,76
7	0,11	0,12	99,88
8	0,09	0,10	99,98
9	0,04	0,01	99,99
10	0,0000000108	0,01	100,00

Fonte: Resultados originais da pesquisa

Na CP1: N-DVD, P e K, são as variáveis que possuem maiores variabilidades nos dados, ou seja, proporcionam maiores diferenças entre os tratamentos que foram aplicados. O segundo grupo de variáveis mais importantes estão na segunda componente principal CP2 e são a NO_3^- e FDA, respectivamente, conferindo as maiores variabilidades nesta componente. A tabela abaixo demonstra as cargas fatoriais da combinação linear de cada componente principal (Tabela 6).

Tabela 6- Cargas fatoriais dos componentes principais 1 e 2 de 2020

Variável	CP 1	CP 2
CBM	0.333	0.252
NBM	0.324	-0.446
RB	0.277	0.000
Urease	0.333	0.179
FDA	0.263	0.542
NH_4^-	0.259	0.165
NO_3^-	0.263	-0.569
N-DVD	0.366	0.115
P	0.361	-0.216
K	0.356	0.000

Fonte: Resultados originais da pesquisa

A análise de componentes principais (ACP) consiste em transformar o conjunto de dados composto pelas variáveis químicas e microbiológicas em um outro conjunto denominado componentes principais. Foi obtido um número de componentes principais igual ao número de variáveis, sendo elas uma combinação linear de cada variável utilizada na análise. Além disso, as correlações entre as componentes são

nulas. A ACP reduz as informações das variáveis de estudo em um número menor de variáveis sem perdas significativas de informações.

A rede de correlação de Pearson permitiu contribuir para a análise das inter-relações entre as variáveis. Foi obtida a partir da matriz de correlação de Pearson, sendo as cores verdes indicado correlação positiva e vermelha correlação negativa entre as variáveis. A espessura das linhas que ligam as variáveis é proporcional a magnitude da correlação e as correlações acima de 50% foram destacadas nas figuras.

Para a CP1 os vetores N-DVD, P e K, são os que possuem maior magnitude e estão mais próximas do eixo. Os tratamentos em direção oposta e mais distantes são os que possuem os menores teores destas variáveis, portanto, o sistema 3 na profundidade 0,10-0,20 m é o que possui menor N-DVD; o sistema 5 na profundidade 0,10-0,20 m o menor P e o sistema 1 na mesma camada o menor K. Para a variável P, ao analisar as profundidades superior e inferior, os sistemas na profundidade inferior são cerca de 70% mais elevados.

Para o eixo da componente principal 2, podemos verificar que os vetores NO_3^- e FDA são os que possuem maiores magnitudes e estão mais próximos do eixo. O sistema 5 (0-0,10 m) se diferenciou dos demais e a variável que mais contribuiu para essa variabilidade foi FDA. Portanto, os maiores valores de FDA foram encontrados no S5 na camada superior do solo, enquanto os menores foram encontrados nos sistemas 3, 2 e 4 da camada 0,10-0,20 m, respectivamente.

Já o sistema 4 (0-0,10 m) se diferenciou dos demais e as variáveis NO_3^- e CMB foram quem mais contribuíram para a variabilidade, sendo observado neste sistema os maiores valores de NO_3^- e CBM. Em contrapartida, os sistemas 1, 4 e 3 (0,10-0,20 m), respectivamente, foram os que obtiveram os menores valores de NO_3^- e CMB.

Podemos observar também, as principais inter-relações entre as variáveis. Os vetores P, NBM e NO_3^- estão apontados no mesmo sentido, portanto estão positivamente correlacionados. Além disso podemos verificar outros agrupamentos, tais como K e N-DVD; e também CBM, NH_4^+ e Urease. Comportamentos estes que podem ser vistos também na rede de correlações de Pearson (Figura 27).

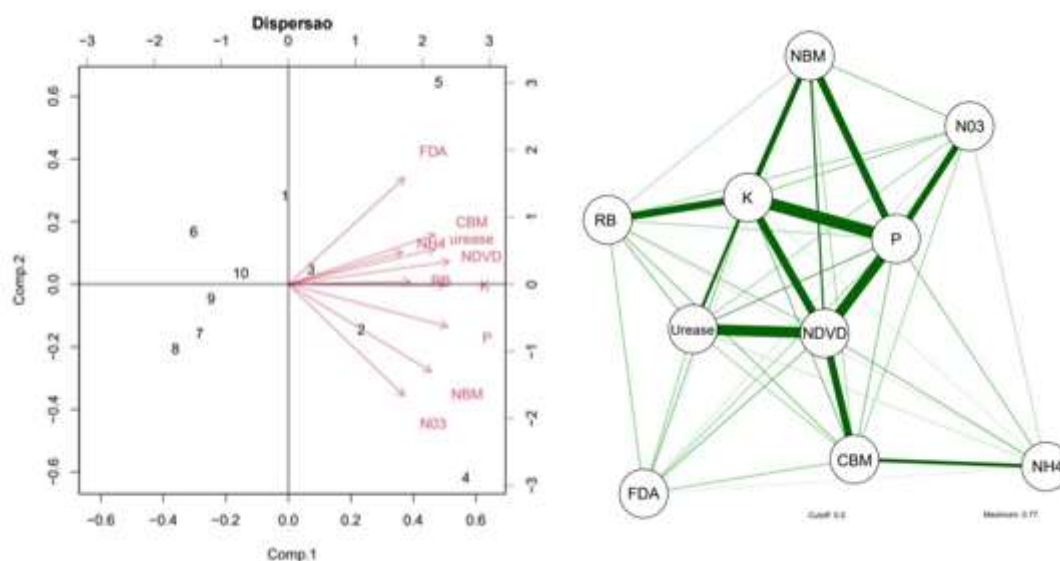


Figura 27 - Componentes principais e rede de correlações de Pearson para as variáveis químicas teores de NH_4^+ , NO_3^- , P, K e N-DVD (NST), e microbiológicas atividade enzimática FDA, atividade da enzima urease (UR), nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), carbono da biomassa microbiana (CBM) e respiração basal do solo (RB) nos diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no ano de 2020. Cristal/RS.

Fonte: Resultados originais da pesquisa

Para o ano de 2021, analisando o percentual de variância explicada por cada uma das componentes principais geradas podemos verificar que o componente 1 explica 51.51% da variabilidade dos dados e o componente 2 explica 22.70% da variabilidade dos dados, sendo assim, a proporção acumulativa de variância explicada pelos dois primeiros componentes principais é 74.21%. Logo, os dois primeiros componentes conseguem obter uma boa caracterização da variabilidade do conjunto de dados (Tabela 7).

Tabela 7- Importância dos componentes

PC	Eigenvalue	Variance (%)	Acumulative (%)
1	2,27	51,51	51,51
2	1,51	22,70	74,21
3	1,04	10,76	84,97
4	0,79	5,91	90,88
5	0,64	4,06	94,94
6	0,59	3,46	98,40
7	0,30	0,88	99,28
8	0,22	0,48	99,76
9	0,15	0,23	99,99
10	0,0000000174	0,01	100,00

Fonte: Resultados originais da pesquisa

Analisando as cargas fatoriais da combinação linear de cada componente principal. Na CP1: RB, N-DVD e P, são as variáveis que possuem maiores variabilidade nos dados, ou seja, proporcionam maiores diferenças entre os tratamentos que foram aplicados. O segundo grupo de variáveis mais importantes estão na segunda componente principal CP2 e são a NBM, NH₄⁺ e Urease, respectivamente, conferindo as maiores variabilidades nesta componente (Tabela 8).

Tabela 8 - Cargas fatoriais dos componentes principais 1 e 2 de 2021

Variável	CP 1	CP 2
CBM	0.319	0.120
NBM	0.135	-0.585
RB	0.426	0.000
Urease	0.292	-0.445
FDA	0.352	0.205
NH ₄	0.000	0.531
N ₀₃	0.363	0.251
N-DVD	0.371	0.000
P	0.367	-0.189
K	0.277	0.150

Fonte: Dados originais da pesquisa

O gráfico entre os dois primeiros componentes principais e a rede de correlações de Pearson foram gerados. Para o eixo da CP1 os vetores RB, N-DVD e P, são os que possuem maior magnitude e estão mais próximas do eixo. Os sistemas em direção oposta e mais distantes são os que possuem os menores teores destas variáveis, portanto, os agrupados S1, S4 e S5 (0,10-0,20 m) demonstram baixos valores de RB, N-DVD e P. Para o eixo da componente principal 2, podemos verificar que os vetores NBM, NH₄⁺ e Urease são os que possuem maiores magnitudes e estão mais próximos do eixo. O Sistema 4 (0-0,10 m) se diferenciou dos demais e a variável que mais contribuiu para essa variabilidade foi NBM.

Portanto, os maiores valores de NBM foram encontrados no S4 (0-0,10 m), enquanto os menores foram encontrados no tratamento S1 na profundidade 0,10-,20 m, S2 e S3 (0-0,10 m), respectivamente. Na camada superior do solo o tratamento S5 ficou próximo do S4 devido a influência da variável NBM, mas diferenciou dos demais principalmente devido a maior influência da variável Urease, sendo o tratamento com os maiores valores de Urease. O sistema 2 (0-0,10 m) se diferenciou dos demais e as

variáveis que mais contribuíram para essa diferença foram NH_4^+ e NO_3^- , sendo este tratamento o que apresentou os maiores valores destas variáveis.

Podemos observar também, as principais inter-relações entre as variáveis. Os vetores NBM, P e Urease estão apontados no mesmo sentido, portanto estão positivamente correlacionados. Além disso podemos verificar outros agrupamentos, tais como N-DVD e RB; e também NO_3^- , FDA, K e CBM. Comportamentos estes que podem ser vistos também na rede de correlações de Pearson (Figura 28).

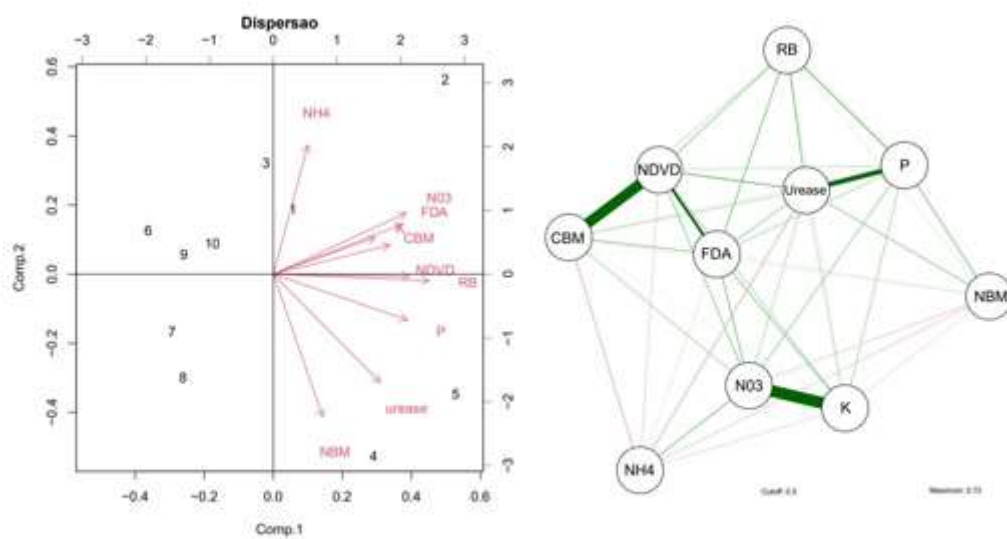


Figura 28 -Componentes principais e rede de correlações de Pearson para as variáveis químicas teores de NH_4^+ , NO_3^- , P, K e N-DVD (NST), e microbiológicas atividade enzimática FDA, atividade da enzima urease (UR), nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), carbono da biomassa microbiana (CBM) e respiração basal do solo (RB) nos diferentes Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no ano de 2021. Cristal/RS

Fonte: Resultados originais da pesquisa

7. Discussão

A respiração basal é o processo pelo qual os microrganismos do solo decompõem a matéria orgânica (MOS) e liberam CO₂ como subproduto. Este processo é influenciado por diversos fatores, incluindo a quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo, temperatura e teor de umidade (MOURA *et al.*, 2015).

A profundidade na qual as amostras de solo são coletadas também pode ter um impacto significativo nas medidas de atividade microbiana e respiração basal em sistemas agrícolas, porque os microrganismos do solo são mais ativos na sua camada superficial, onde o teor de matéria orgânica é maior e as condições ambientais são mais favoráveis para o seu desenvolvimento (HUNGRIA, *et al.*, 1994), explicando a diferença observada quando o parâmetro foi avaliado de 0-0,10 m e de 0,10-0,20 m de profundidade. Esse dado também corrobora com o encontrado por Oliveira *et al.* (2014) na avaliação de duas profundidades de coleta em diferentes sistemas de manejo.

Não foram observadas diferenças significativas entre os sistemas de produção adotados e a testemunha, na liberação de CO₂ pela respiração basal ao longo dos anos. Alves *et al.* (2011) e Franco *et al.* (2020) também não observaram diferenças entre os sistemas de integração adotados, para esta variável. A respiração basal é utilizada para a avaliação dos efeitos do manejo do solo (SANTOS *et al.*, 2019), e só é observada significativamente em sistemas de integração, a longo prazo (BONETTI *et al.*, 2018). Ainda, a fonte de substrato e a nutrição do solo podem interferir nos valores de respiração basal (FRANCAVIGLIA *et al.*, 2022).

Nota-se, no entanto, a superioridade (mesmo que mínima) dos sistemas de integração em relação ao sistema tradicional de cultivo arroz – pousio – arroz, especialmente na primeira e na última coleta, na camada 0-10 cm. Carvalho *et al.* (2010) já demonstraram que a atividade microbiana e, conseqüentemente, a respiração basal podem ser afetadas pelo pastejo e sua intensidade, obtendo-se uma correlação positiva entre as variáveis.

Para as variáveis de Carbono e Nitrogênio na Biomassa Microbiana não houve diferenças significativas entre os SIPAs, no entanto, alguns destes foram superiores à testemunha. A biomassa microbiana representa cerca de 1 a 5% do carbono orgânico (BALOTA, 2017) e o nitrogênio contido é a maior parte do nitrogênio biologicamente ativo do solo (XING *et al.*, 2022). A biomassa microbiana se

correlaciona intimamente com os teores de matéria orgânica (MOS) e, consequentemente, com a fertilidade, respondendo rapidamente às práticas que levam ao acréscimo ou decréscimo da MOS (CARDOSO; ANDREOTE, 2016). Manejos como o plantio direto (DENARDIN *et al.*, 2019), a rotação de culturas (CARLOS *et al.*, 2022) e a adoção de sistemas integrados de produção (MARTINS *et al.*, 2017) deveriam aumentar a disponibilidade da MOS e consequentemente do C e do N na biomassa microbiana.

Alves *et al.* (2011), estudando a integração lavoura-pecuária encontrou valores de CBM também abaixo do esperado. Alguns autores explicam que taxas menores desses nutrientes são indicativos de solos com baixa fertilidade e/ou de áreas degradadas (SILVEIRA *et al.*, 2006). Ainda as concentrações de NBM podem ter sido influenciadas pela relação C/N dos resíduos vegetais (ABBASI *et al.*, 2015), e pela sua diversidade (MARTINS *et al.*, 2017).

A baixa na reserva de NBM após a cultura do arroz reflete a importância desse nutriente para a cultura, visto que a sua absorção ocorre durante todo o ciclo produtivo do cereal, com grandes exigências especialmente nas fases reprodutiva e de perfilhamento (SCIVITTARO *et al.*, 2018).

Barbieri *et al.* (2019), observaram aumento na atividade enzimática microbiana em decorrência da adoção de sistemas de plantio direto. A hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) é uma prática que vem sendo amplamente utilizada para avaliar a qualidade do solo (GAJDA *et al.*, 2018; SERRI *et al.*, 2022) podendo ser um bom indicativo para as áreas com sistemas integrados de produção. Isto se dá pelo FDA ser hidrolisado por várias enzimas (lipases, proteases e esterases), presentes nos microrganismos, o que torna o processo um bom indicador da atividade microbiana nos solos (CHÁVEZ *et al.*, 2011). De acordo com Mendes *et al.* (2019), a atividade enzimática total de um solo é o somatório da atividade enzimática dos organismos vivos (microrganismos, plantas e animais) e das enzimas abiômicas, que são enzimas associadas à fração não viva e que se acumulam no solo protegidas da ação de proteases por meio de sua adsorção em partículas de argila e na matéria orgânica. A atividade enzimática do solo engloba reações metabólicas e processos bioquímicos que são coordenados por organismos presentes nesse ambiente (SILVA; SIQUEIRA; COSTA, 2004).

O diacetato de fluoresceína (FDA) é um composto orgânico que auxilia na determinação dessa atividade, uma vez que os microrganismos possuem enzimas

com a capacidade de o hidrolisarem e fixarem a fluoresceína nas células, o que possibilita a sua quantificação através da emissão de fluorescência (DENARDIN *et al.*, 2020). Desta forma, estabelece-se uma correlação positiva: quanto maior for a hidrólise e fixação, maior é a atividade microbiológica que está ocorrendo no ambiente (SWISHER; CARROLL, 1980).

O sistema 5 foi significativamente diferente do sistema 2 para esta variável, mas teve desempenho igual ao sistema 1. Manejos de plantio direto, rotação de culturas e pastejo estão entre os fatores que desencadeariam mudanças na atividade microbiológica do solo, entre outros, por ocasião do fluxo e disponibilidade dos nutrientes (CARLOS *et al.*, 2020). A atividade semelhante de FDA entre os sistemas pode estar relacionada à sua baixa capacidade de degradar substâncias mais complexas, como é o caso de compostos húmicos, que constituem parte do C do solo (ALI *et al.*, 2019; CARLOS *et al.*, 2020).

A atividade da Urease se destacou durante a coleta de 2020 no sistema 5, em relação à testemunha, e no ano subsequente nos sistemas 4 e 5, que foram superiores ao sistema 1.

A urease é a enzima responsável pela hidrólise da uréia (principal fertilizante) em amônia (BURNS *et al.*, 2013). Balota *et al.* (2017) expõe que altas taxas de atividade dessa enzima pode significar perdas, devido a volatilização da amônia. No entanto, Carlos *et al.* (2020) acredita que a inerente atividade da enzima favoreça o processo de mineralização N orgânico, que pode ser incorporado as culturas ou aos microrganismos na forma de N inorgânico favorecendo o sistema produtivo.

Os cultivos fontes de resíduos orgânicos, mas principalmente os animais inseridos nos sistemas de integração são uma fonte de ureia biológica, favorecendo a atividade da urease e dos microrganismos do solo (CARLOS *et al.*, 2020; SOUSA *et al.*, 2020).

Os resultados demonstraram que o nitrogênio mineral na forma de NH_4^+ não diferiu significativamente entre os sistemas, muito embora a atividade da urease tenha sido significativa para a conversão de N – NH_4^+ ; no entanto, a transformação de N em sua forma reduzida, NO_3^- , foi significativamente superior no sistema 4, onde havia rotação de alta diversidade, além do fator animal.

De acordo com SOUZA (2017) a MOS é primeiramente mineralizada à forma oxidada do nitrogênio, amônio (NH_4^+), para depois ser reduzida à nitrato (NO_3^-), pelo processo de nitrificação. No entanto, este último demanda maior energia, é realizado

por bactérias aeróbicas (e, portanto, pode não ocorrer em solos alados), estando susceptível a processos de perda por desnitrificação (SILVA *et al.*, 2011; MASCARENHAS, 2018).

D'Andréa *et al.* (2004) avaliando sistemas de plantio direto e rotação de culturas constatou maior concentração N- NO_3^- em detrimento à N- NH_4^+ , e atribuiu o fato a possíveis adubações ou correções de acidez solo que possam criar condições favoráveis aos microrganismos nitrificantes.

Flutuações nos níveis de N- NO_3^- entre os períodos de pousio pós arroz e pós safra foram interpretados como ganhos de mineralização e nitrificação e perdas por absorção da cultura por Willett e Higgins (1980).

Para o nitrogênio potencialmente mineralizável, os sistemas de integração 4 e 5 foram superiores à testemunha. Esses sistemas correspondem à rotação de alta diversidade (S4) e baixa diversidade (S5). Em sua avaliação Bu *et al.* (2015) observou a diminuição significativa de N potencialmente mineralizável na remoção de uma fonte de matéria orgânica do solo, sugerindo que os diferentes sistemas de integração possuem um papel importante para esta variável.

Além disso, também já foi demonstrado que sistemas de manejo com fertilização orgânica aumentam a mineralização bruta do N e o seu potencial mineralizável, quando em comparação com a utilização de fertilização inorgânica (OSTERHOLZ *et al.*, 2017).

Em um estudo que comparou o manejo da palhada sobre rotações de arroz-alqueive, arroz-trigo e arroz batata, Liu *et al.* (2022) constataram que a palha afetou não apenas a variável de mineralização potencial do nitrogênio, como também a comunidade de microrganismos residentes no solo.

Cabe salientar que este estudo não considerou a produtividade dos cultivos, e que muito provavelmente a quantificação do N exportado pelas culturas de grão ou forragem explicaria de forma mais assertiva os resultados obtidos nos estudos de solo.

No que diz respeito as variáveis de fósforo (P) e potássio (K), houve diferença, novamente, apenas nos sistemas 4 e 5 em relação à testemunha, para o P, no ano de 2020.

Assmann *et al.* (2014) e Carvalho *et al.* (2010) observam que as mudanças no fluxo dos nutrientes no solo têm sido ocasionadas especialmente pela inserção de animais nos sistemas integrados. Costa *et al.* (2014) constatou que em solos de terras

altas, o aumento de fósforo orgânico pode ser em virtude da rotação de culturas e do animal no pastejo.

O manejo adequado das plantas forrageiras, no período que se faria pousio na lavoura, também representa uma adição aos níveis de P e K ao sistema. De modo geral essas culturas podem atuar de forma eficiente na ciclagem de nutrientes, fazendo com que diferentes arranjos gerem diferentes resultados (MARTINS *et al.*, 2017) como é o caso deste trabalho. Muito embora não se tenha constatado diferença significativa entre os sistemas no que tange ao potássio, autores acreditam que os SIPAS possam contribuir para fertilização do mineral com cerca de 30 kg ha⁻¹ de K (ASSMANN *et al.*, 2017). Apesar da exportação de nutrientes pelas culturas não ter sido levada em conta neste trabalho, Denardin e seus colaboradores (2020) constataram em trabalho semelhante que a produtividade da soja em SIPAs que incluem pastejo animal não responde à adubação com P e K, indicando que a ciclagem de nutrientes seria suficiente para o manejo nutricional da cultura.

A ausência de resultados significativos para a maioria das variáveis traz uma reflexão a respeito da adoção de um sistema produtivo por longo períodos de tempo. Sabe-se que em sistemas de plantio direto, a consolidação do mesmo depende de um determinado período de tempo, porém a partir deste estudo surge uma questão referente à homogeneização da área sem revolvimento da camada superior por muitos anos, onde possivelmente apenas o fator cultivo não seja suficiente para provocar alterações. Neste sentido, a adoção de um sistema por longo período de tempo, sem revolvimento poderia estar contribuindo para a estabilidade dos caracteres avaliados no estudo.

Os sistemas integrados de produção com rotação e sucessão de culturas que incluem leguminosas no inverno e pastejo de gado contribuem para o aumento do estoque de nitrogênio potencialmente mineralizável, acarretando em um possível incremento do nutriente no cultivo do arroz irrigado.

De acordo com os parâmetros estudados, a atividade enzimática total de um solo sem revolvimento da camada superficial após anos de cultivo não apresenta diferença em relação ao sistema de monocultivo de arroz. Por outro lado, a atividade da enzima urease se faz mais presente em sistemas que recebem além da soja, um cultura leguminosa hibernal no sistema.

8. Conclusão

O arroz é base da alimentação humana em diversos países em desenvolvimento, como o Brasil. Produzir em larga escala é uma necessidade. Porém, decorrente dos altos níveis de produtividade alcançados o uso de insumos externos como fertilizantes e pesticidas são cada vez mais necessários. Neste contexto os sistemas integrados de produção são uma opção para que altas produtividades sejam alcançadas em um ambiente mais sustentável financeira e ecologicamente.

Adotar o uso de uma leguminosa consorciada com gramínea (Trevo-persa+azevém) como plantas de cobertura ou pastagem no inverno em sucessão ao arroz, e a soja como rotação de cultura é uma opção que traz diversos benefícios para o sistema produtivo do arroz. Economicamente, a soja é uma alternativa rentável e de menor custo de produção em relação ao arroz, o gado possibilita ao produtor uma renda extra e de fácil disposição em períodos de maior necessidade. A possibilidade do produtor trabalhar com três moedas faz com que os SIPAS sejam atrativos, dando a possibilidade de escolha nas negociações.

As boas produtividades das culturas inseridas no sistema são possibilitadas em função das melhorias químicas, físicas e microbiológicas do solo que tem a capacidade entre elas de promover o aumento dos teores de matéria orgânica, como consequência o aumento da CTC do solo, visto que os grupos funcionais da matéria orgânica geram cargas negativas na superfície do solo, facilitando a adsorção de cátions como o K^+ e o NH_4^+ , reduzir perdas de solo e de nutrientes por escoamento superficial e lixiviação, a ação das raízes de plantas de cobertura no processo de melhoria da estrutura física do solo, assim como os exsudatos de microrganismos. Além disso, a presença de plantas durante o ano todo possibilita uma menor infestação de plantas daninhas, devido à supressão causada pelas plantas de cobertura, o não revolvimento de solo e a possibilidade de utilizar diferentes mecanismos de ação herbicida.

A adoção de sistemas integrados pode colaborar para a diminuição da dependência de insumos altamente solúveis visto que a fertilidade do solo é construída ao longo dos anos com a melhor ciclagem de nutrientes, pode levar a redução do uso de defensivos agrícolas por ter um melhor controle natural das plantas daninhas, além da maior atividade microbiana ser mais efetiva em degradar as moléculas químicas de herbicidas e pesticidas.

Sendo assim, o cultivo de arroz dentro de um sistema integrado contribui economicamente para que a rentabilidade do produtor seja mantida, cumprindo seu papel social mantendo o produtor na atividade e a produção de alimento e ambientalmente tornando a produção mais limpa, menos poluente, promovendo serviços ecossistêmicos.

Referências

- ABBASI, M. K. *et al.* Impact of the addition of different plant residues on nitrogen mineralization–immobilization turnover and carbon content of a soil incubated under laboratory conditions. **Solid Earth**, v. 6, p. 197–205, 2015. doi:10.5194/se-6-197-2015
- ADAM, G.; DUNCAN, H. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 33, n. 7–8, p. 943– 951, 2001. DOI:10.1016/S0038-0717(00)00244-3
- AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Decomposição e liberação de nitrogênio dos resíduos culturais de plantas de cobertura solteiras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa/MG, v. 27, p. 601-612, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000400004>
- ALI, W. *et al.* The effects of organic and inorganic phosphorus amendments on the biochemical attributes and active microbial population of agriculture podzols following silage corn cultivation in boreal climate. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1-17, 2019. DOI <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53906-8>
- ALVES, T. dos S. *et al.* Biomass and soil microbial activity under native vegetation and different soil managements. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, p. 341-347, 2011. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.4841>
- ANDREOLA, F.; FERNANDES, S. A. P. A Microbiota do Solo na Agricultura Orgânica e no Manejo das Culturas. In: SILVEIRA, A. P. D.; FREITAS S. dos S. (Eds.). **Microbiota do solo e qualidade ambiental**. Campinas: Instituto Agronômico, 2007. 312 p.
- ANGHINONI, I.; CARLOS, F. S. **O cenário para a diversificação. Sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas**. 1ed. Porto Alegre: Departamento de Solos - UFRGS, 2018, v. 1, p. 25-30.
- ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. de F.; COSTA, S. de A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. **Tópicos em ciência do solo**, v. 8, n. 2, p. 325-380, 2013.
- ARYAL, J. P. *et al.* Climate change and agriculture in South Asia: Adaptation options in smallholder production systems. **Environment, Development and Sustainability**, v. 22, n. 6, p. 5045-5075, 2020. DOI:10.1007/s10668-019-00414-4
- ASSMANN, J. M. *et al.* Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop–livestock system under no-tillage in southern Brazil. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 190, p. 52-59, 2014. DOI:10.1016/j.agee.2013.12.003
- ASSMANN, J. M. *et al.* Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities

insubtropics. **Nutrient cycling in agroecosystems**, v. 108, p. 21-33, 2017. DOI:10.1007/s10705-016-9818-6

BALOTA, E. L. **Manejo e qualidade biológica do solo**. Londrina: MECENAS, 2017. 288 p.

BAMBERG, A. L. *et al.* Densidade de um planossolo sob sistemas de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1079-1086, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500001>

BARBIERI, M. *et al.* Ensaio sobre a bioatividade do solo sob plantio direto em sucessão e rotação de culturas de inverno e verão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, p. 122-134, 2019. DOI: <https://doi.org/10.19084/RCA17068>

BATISTA, M. A. *et al.* Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. In: BRANDÃO-FILHO, J. U. T.; FREITAS, P. S. L.; BERIAN, L. O. S.; GOTO, R. **Hortaliças-fruto**. Maringá: EDUEM, p. 113-161, 2018. <https://doi.org/10.7476/9786586383010.0006>

BELARMINO, L. C. *et al.* Aspectos da economia do arroz irrigado no bioma pampa. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia rural. Campinas. **Transformações recentes na agropecuária brasileira: desafios em gestão, inovação, sustentabilidade e inclusão social: anais**. Campinas: SOBER, 2018.

BISWAS, S. *et al.* Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders. **Geoderma**, v. 292, p. 34-48, 2017. DOI:10.1016/j.geoderma.2017.01.003

BOHNEN, H. *et al.* Ácidos orgânicos na solução de um gleissolo sob diferentes sistemas de cultivo com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 475-480, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000300018>

BONETTI, J. de A. *et al.* Soil physical and biological properties in an integrated crop-livestock system in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 1239-1247, 2018. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018001100006>

BOTTA, G. F. *et al.* Alternatives for handling rice (*Oryza sativa* L.) straw to favor its decomposition in direct sowing systems and their incidence on soil compaction. **Geoderma**, v. 239, p. 213-222, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.10.021>

BROOKES, P. C. *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. **Soil Biol. Biochem.** v. 17, p. 837-842, 1985. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90144-0)

BRUTTI, M. A. **Utilização do Sistema John Deere - Surface Water PRO e CR - CAMPEIRO 7 para obtenção de dados altimétricos para o manejo do arroz irrigado (Oryza Sativa)**. 62 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura de precisão) - Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico, Santa Maria/RS, 2014.

BU, R. *et al.* Particulate organic matter affects soil nitrogen mineralization under two crop rotation systems. **PLoS One**, v. 10, n. 12, p. e0143835, 2015.

BURNS, R. G. *et al.* Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 58, p. 216-234, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>

BUSHONG, J.T.; ROBERTS, T.L.; ROSS, W.J.; NORMAN, R.J.; SLATON, N.A.; WILSON, C.E. Evaluation of distillation and diffusion techniques for estimating hydrolyzable amino sugar-nitrogen as a means of predicting nitrogen mineralization. **Soil Science Society of America Journal**, v.72, p.992-999, 2008. DOI: 10.2136/sssaj2006.0401.

CALEGARI, A.; COSTA, A. Manutenção da cobertura melhora atributos do solo. **Revista Visão Agrícola**, v. 9, p. 13-16, 2009.

CAMARGO, F. A. O.; SANTOS, G. A.; ZONTA, E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. **Ciência Rural**, v. 29, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0103-84781999000100032>

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do Solo**. 2 ed. Piracicaba: ESALQ, 2016. 221 p.

CARLOS, F. S. *et al.* Integrated crop–livestock systems in lowlands increase the availability of nutrients to irrigated rice. **Land Degradation & Development**, v. 31, n. 18, p. 2962-2972, 2020. DOI:10.1002/ldr.3653

CARLOS, F. S. *et al.* Soybean crop incorporation in irrigated rice cultivation improves nitrogen availability, soil microbial diversity and activity, and growth of ryegrass. **Applied Soil Ecology**, v. 170, p. 104313, 2022. DOI:10.1016/j.apsoil.2021.104313

CARMONA, F. de C. *et al.* **Sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas: a integração lavoura-pecuária como o caminho da intensificação sustentável da lavoura arrozeira**. Porto Alegre: edição dos autores, 2018. 160 p.

CARVALHO, G. D.; CAMPOS, A. B. de; FAGERIA, N. K. Mudanças químicas na solução do solo de várzea inundado sob cultivo de arroz. In: **Congresso brasileiro de ciência do solo, Uberlândia. Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas: anais**. Uberlândia: UFU, ICIAG, 2011.

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

CARVALHO, P. C. de F. *et al.* Animal production and soil characteristics from integrated crop-livestock systems: toward sustainable intensification. **Journal of animal science**, v. 96, n. 8, p. 3513-3525, 2018. DOI: 10.1093/jas/sky085

CASSOL, G. V. *et al.* Sensitivity of imidazolinone-resistant red rice (*Oryza sativa* L.) to glyphosate and glufosinate. **Ciência Rural**, Santa Maria/RS, v. 45, p. 1557-1563, 2015. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140896>

CHÁVEZ, L. F. *et al.* Diversidade metabólica e atividade microbiana no solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob intensidades de pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1254-1261, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000020>

CHEN, Z; WANG, H; LIU, X; ZHAO, X; LU, D; ZHOU, J; LI, C. Changes in soil microbial community and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice–wheat cropping system. **Soil and Tillage Research**, 165, 121-127.2017. DOI:10.1016/j.still.2016.07.018

CHEN, S; DING, X. Q; ZHU, Z. K; WANG, J; PENG, P. Q; GE, T. D; WU, J. S. Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil. **Huan jing ke xue Huanjing kexue**, 38(4), 1613-1621. 2017. DOI: 10.13227/j.hjxx.201609219

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2022/23** – Terceiro levantamento. Brasília: CONAB, 2022. v. 10.

CONCEIÇÃO, P. C. *et al.* Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 777-788, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000500013>

COSTA, S. *et al.* Impact of an integrated no-till crop–livestock system on phosphorus distribution, availability and stock. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 43-51, 2014. Doi 10.1016/j.agee.2013.12.001

D'ANDRÉA, A. F. *et al.* Carbon and nitrogen storage, and inorganic nitrogen forms in a soil under different management systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 179-186, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000200012>

DENARDIN, L. G. de O. *et al.* No-tillage increases irrigated rice yield through soil quality improvement along time. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 64-69, 2019. DOI:10.1016/j.still.2018.10.006

DENARDIN, L. G. de O. *et al.* Soybean yield does not rely on mineral fertilizer in rotation with flooded rice under a no-till integrated crop-livestock system. **Agronomy**, v. 10, n. 9, p. 1371, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091371>

DHALIWAL, S. S. *et al.* Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 1, p. 100007, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2019.100007>

DICK, R. P.; BREACKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J. W.;

JONES, A. J., (Eds.) **Methods for assessing soil quality**. Madison, SSSA, p. 247-271, 1996.

DICK, D.P.; GOMES, J.; ROSINHA, P. B. Caracterização de substâncias húmicas extraídas de solos e de lodo orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, 603-611, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400005>

DONEDA, A. *et al.* Fitomassa e decomposição de resíduos de plantas de cobertura puras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1714-1723, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600005>

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

FRANCAVIGLIA, R. *et al.* Agricultural diversification: Benefits and barriers for sustainable soil management. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 2116, 2022.

FERREIRA, Adão de Siqueira. **Efeitos da adição de resíduos de curtume e carboníferos nas plantas e no solo**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Solos) Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

FRANZLUEBBERS, A. J. *et al.* Toward agricultural sustainability through integrated crop–livestock systems. III. Social aspects. **Renewable agriculture and food systems**, v. 29, n. 3, p. 192-194, 2014. DOI:10.1017/S174217051400012X

FREDERICK, J. R.; HESKETH, J. D. Genetic improvement in soybean: physiological attributes. In: **Genetic improvement of field crops**. CRC Press, 2021. p. 237-286. DOI:10.1201/9781003210238-5

GAJDA, A. M. *et al.* Effects of different soil management practices on soil properties and microbial diversity. **International Agrophysics**, v. 32, n. 1, p. 81, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0089>

GIACOMINI, S. J. *et al.* Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 325-334, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200012>

GOMES, J. P. A. *et al.* Uso de microrganismos eficientes como alternativa para agricultura sustentável: um referencial teórico. **Agroecologia: Métodos e Técnicas para uma Agricultura Sustentável**, v. 5, p. 340-355, 2021. DOI: **10.37885/210604968**

GOULART, R. Z.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES, M. F. Cropping poorly-drained lowland soils: Alternatives to rice monoculture, their challenges and management strategies. **Agricultural Systems**, v. 177, p. 102715, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102715>

HAIR, J. F., BLACK, W. C., BABIN, B. J., ANDERSON, R. E., & TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. Bookman editora, 2009.

HEI, Z. *et al.* Rice intercropping with water mimosa (*Neptunia oleracea* Lour.) can facilitate soil N utilization and alleviate apparent N loss. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 313, p. 107378, 2021. 10.1016/j.agee.2021.107378

HUNGRIA, M. *et al.* Ecologia microbiana em solos sob cultivo na região sul do Brasil. **36º Simpósio Brasileiro sobre microbiologia do solo**. Microbiologia do solo: Desafios para o século XXI, anais. Londrina, IAPAR/EMBRAPA – CNPSo, 1994. p. 234-270.

IRGA – Instituto Rio-Grandense do Arroz. **Boletim de resultados da safra 2020/21 em terras baixas: arroz e soja**. Porto Alegre: IRGA, 2021.

IRGA – Instituto Rio-Grandense do Arroz. **Boletim de resultados da safra 2021/22 em terras baixas: arroz e soja**. Porto Alegre: IRGA, 2022.

ISHFAQ, M. *et al.* Influence of nitrogen fertilization pattern on productivity, nitrogen use efficiencies, and profitability in different rice production systems. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, p. 145-161, 2021. DOI:10.1007/s42729-020-00349-0

KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R. Global spread of conservation agriculture. **International Journal of Environmental Studies**, v. 76, n. 1, p. 29-51, 2019. <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927>

KNOBLAUCH, R. *et al.* Volatilização de amônia em solos alagados influenciada pela forma de aplicação de ureia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 813-822, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300012>

KOKUBUN, M. Genetic and cultural improvement of soybean for waterlogged conditions in Asia. **Field Crops Research**, v. 152, p. 3-7, 2013. <https://doi.org/10.31413/nativa.v10i3.13332>

LEMO, G. da S.; RIZZI, R. A expansão da soja no bioma pampa brasileiro e sua interação espaço-temporal com arroz e campo. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, n. 35, p. 9-26, 2020.

LIU, S. *et al.* Fifteen years of crop rotation combined with straw management alters the nitrogen supply capacity of upland-paddy soil. **Soil and Tillage Research**, v. 215, p. 105219, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105219>

LIU, X. *et al.* Transformations of N derived from straw under long-term conventional and no-tillage soils: A 15N labelling study. **Science of The Total Environment**, v. 786, p. 147428, 2022. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.147428

MARCELO, A. V. *et al.* Crop sequences in no-tillage system: effects on soil fertility and soybean, maize and rice yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 417-428, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000200019>

MASCARENHAS, Y. S. **Emissão de gases de efeito estufa em arroz irrigado em várzea tropical**. 123 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO, 2018.

MATTOS, M. L. T. Microbiologia do Solo. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Org.). **Recurso solo: propriedades e usos**. 1ed. São Carlos: Cubo, v. 1, p. 250-272, 2015.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; LOPES, A. A. C.; SOUZA, L. M. Bioanálise de solo: Aspectos teóricos e práticos. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. X, p. 399-462, 2019a.

MORAES, A. de et al. Integrated crop-livestock systems as a solution facing the destruction of pampa and cerrado biomes in South America by intensive monoculture systems. **Agroecosystem Diversity. Academic Press**, 2019. p. 257-273.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2ed. Lavras: Editora UFLA, 729 p., 2006.

MOURA, J. A. et al. Respiração basal e relação de estratificação em solo cultivado com citros e tratado com resíduos orgânicos no estado de Sergipe. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 2, p. 731-746, 2015. DOI: 10.5433/1679-0359.2015v36n2p731

NASCIMENTO, P. C. et al. Sistemas de manejo e a matéria orgânica de solo de várzea com cultivo de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1821- 1827, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600030>

NICOLARDOT, B.; RECOUS, S.; MARY, B. Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: A simple dynamic model based on the C/N ratio of the residues. **Plant Soil**, v. 228, p. 83-103, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1004813801728>

NIE, SA, LEI, X., ZHAO, L., WANG, Y., WANG, F., LI, H., XING, S. Resposta da atividade, abundância e composição da comunidade bacteriana anammox a diferentes adubações em solo irrigado. **Biologia e fertilidade dos solos**, 54 , 2018, 977-984.

OLIVEIRA, A. B. et al. **Coleção 500 perguntas, 500 respostas**. Brasília, DF. Embrapa, 2019.

OLIVEIRA, K. B. et al. Análise de atividade microbiana do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades pelo método de hidrólise de diacetato de fluoresceína. **IX Jornada Acadêmica da Embrapa Soja: resumos expandidos**, 2014.

OSTERHOLZ, W. R. et al. Predicting gross nitrogen mineralization and potentially mineralizable nitrogen using soil organic matter properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 5, p. 1115-1126, 2017. DOI: 10.2136/sssaj2017.02.0055

OVIDO, E. M. et al. Taxa de acúmulo de forragem em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) em terras baixas. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 12, n. 2, 2020.

PANDA, D.; NAYAK, A. K.; MOHANTY, S. Nitrogen management in rice. **Oryza**, v. 56, n. 5, p. 125-135, 2019. DOI:10.35709/ory.2019.56.spl.5

PARFITT, J. M. B.; PINTO, M. A. B.; TIMM, L. C. **Efeito da sistematização sobre atributos físicos, químicos e biológicos de um solo de várzea no Rio Grande do Sul**. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento nº 189), Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2014. 30 p.

PINTO, L. F. S.; MIGUEL, P.; PAULETTO, E. A. Solos de várzeas e terras baixas. In: EMYGDIO, B. M.; ROSA, A. P. S. A.; OLIVEIRA, A. C. B. (Org.). **Cultivo de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul**. 1ed. Brasília: Embrapa, p. 23-44, 2017.

POCOJESKI, E. **Disponibilidade do nitrogênio em solos de várzea e parâmetros da planta para avaliação nutricional da cultura do arroz irrigado**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2011.

POLLET, C. S. *et al.* A. Influence of summer crop residues on 15N present in organic matter fractions under two lowland soils. **Ciência Rural**, Santa Maria/RS, v. 49, 2019. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180747>

PONNAMPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils. **Advances in agronomy**, v. 24, p. 29-96, 1972. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60633-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60633-1)

QIU, H.; GE, T.; LIU, J.; CHEN, X.; HU, Y.; WU, J.; KUZUYAKOV, Y. Effects of biotic and abiotic factors on soil organic matter mineralization: Experiments and structural modeling analysis. **European Journal of Soil Biology**, 84, 27-34. 2018. DOI:10.1016/j.ejsobi.2017.12.003

RIBAS, G. G. *et al.* Assessing yield and economic impact of introducing soybean to the lowland rice system in southern Brazil. **Agricultural Systems**, v. 188, p. 103036, 2021. DOI:10.1016/j.agry.2020.103036

REIS, J. C. *et al.* Integrated crop-livestock systems: A sustainable land-use alternative for food production in the Brazilian Cerrado and Amazon. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 124580, 2021. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.124580

RHODEN, A. C. *et al.* Mineralização anaeróbia do nitrogênio em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 36, p. 1780-1787, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000600017>

RHODEN, A. C. *et al.* Relação entre características de solos de várzea e a absorção de nitrogênio pelo arroz irrigado em dois cultivos sucessivos em casa-de-vegetação. **Current Agricultural Science and Technology**, v. 12, n. 3, 2006 DOI:10.18539/CAST.V12I3.4629.

ROBERTS, T.L.; NORMAN, R.J.; SLATON, N.A.; WILSON, C.E.; ROSS, W.J.; BUSHONG, J.T. Direct steam distillation as an alternative to the Illinois Soil Nitrogen

Test. **Soil Science Society of America Journal**, v.73, p.1268-1275, 2009. DOI: 10.2136/sssaj2008.0165.

ROY, A. K. *et al.* Genetic improvement of fodder legumes especially dual purpose pulses. **Indian Journal of Genetics and Plant Breeding**, v. 76, n. 4, p. 608-625, 2016. DOI:10.5958/0975-6906.2016.00076.6

SAID-PULLICINO, D.; MINIOTTI, E. F; SODANO, M.; BERTORA, C.; LERDA, C; CHIARADIA, E. A; CELI, L. Linking dissolved organic carbon cycling to organic carbon fluxes in rice paddies under different water management practices. **Plant and soil**, 401(1-2), 273-290.2016. DOI:10.1007/s11104-015-2751-7

SANTOS, U. J. dos *et al.* Land use changes the soil carbon stocks, microbial biomass and fatty acid methyl ester (FAME) in Brazilian semiarid area. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, n. 6, p. 755-769, 2019. DOI:10.1080/03650340.2018.1523544

SARTORI, G. M. S. *et al.* Rendimento de grãos de soja em função de sistemas de plantio e irrigação por superfície em Planossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 1139-1149, 2015. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015001200003>

SCIVITTARO, W. B. *et al.* **Adubação Nitrogenada e Potássica para Cultivares de Arroz Irrigado**. EMBRAPA, 2018.

SEGURA COLMENARES, A. J.; VERA GÓMEZ, J. A. **Evaluación de los impactos ambientales causados por el Monocultivo de arroz (*Oryza sativa*, L), para la formulación de Alternativas de mitigación**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Francisco de Paula Santander, Colombia, 2019.

SEKARAN, U. *et al.* Papel dos sistemas integrados de lavoura-pecuária na melhoria da produção agrícola e na abordagem da segurança alimentar – Uma revisão. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 5, p. 100190, 2021. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.5-121>

SERRI, D. L. *et al.* Development of a soil quality index for sequences with different levels of land occupation using soil chemical, physical and microbiological properties. **Applied Soil Ecology**, v. 180, p. 104621, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104621>

SHEN, L. *et al.* Broad distribution of diverse anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in Chinese agricultural soils. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 79, n. 19, p. 6167-6172, 2013. doi: 10.1128/AEM.00884-13

SIHI, D. *et al.* Evaluation of soil health in organic vs. conventional farming of basmati rice in North India. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 180, n. 3, p. 389-406, 2017. DOI:10.1002/jpln.201700128

SILVA, H. A. da *et al.* Chemical and physical soil attributes in integrated crop-livestock system under no-tillage. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, p. 946-955, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000500010>

SILVA, L. S.; POCOJESKI, E.; RHODEN, A. C. Dinâmica de nitrogênio mineral após alagamento em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Sêmima: Ciências Agrárias**, v. 32, p. 583-590, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2011v32n2p583>

SILVEIRA, A. D. **Emissões de metano e óxido nitroso em sistemas de rotação de culturas em um Planossolo do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Ciências), Pelotas/RS, 2018.

SILVEIRA, D. C. *et al.* Plantas de cobertura de solo de inverno em Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária. **Plantio Direto**, p.18-23, 2020. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1121117> Acesso em 20 de mai 2023.

SOSBAI – Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**. XXXII ed. Farroupilha: SOSBAI, 2018. v. 32.

SOUSA, R. O.; CAMARGO, F. A. O.; VAHL, L. C. Solos alagados. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de Química do solo**. Porto Alegre: Genesis, 2000. p.127-150.

SOUSA R.O.; BOHNEN H.; MEURER, E. J. Composição da solução de um solo alagado conforme a profundidade e o tempo de alagamento, utilizando novo método de coleta. **Revista Brasileira de Ciência d Solo**. 2002; 26:343-8. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000200007>

SOUSA, R. O.; BORTOLON, L. Crescimento radicular e da parte aérea do arroz (*Oryza sativa* L.) e absorção de nutrientes, em solução nutritiva com diferentes concentrações de ácido acético. **Current Agricultural Science and Technology**, 2002, 8.3.

SOUSA, R. O.; VAHL, L. C.; OTERO, X. L. Química de Solos Alagados. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Org.). **Química e Mineralogia do Solo. Parte II - Aplicações**. 1ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v. 2, p. 485-528.

SOUSA, R. O. *de et al.* No-tillage for flooded rice in Brazilian subtropical paddy fields: history, challenges, advances and perspectives. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, 2021. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210102>

SOUSSANA, J.; LEMAIRE, G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 9-17, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.012>

SOUZA, V. F. **Mecanismo da ciclagem e emissão de oxido nitroso em solos de diferentes latitudes**. 117 f. Tese (Doutorado em Geoquímica Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, Niterói/RJ, 2017.

STRECK, E. V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 3ed. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2018. 252 p.

STROUS, M. *et al.* Ammonium removal from concentrated waste streams with the anaerobic ammonium oxidation (anammox) process in different reactor configurations. **Water Research**, v. 31, n. 8, p. 1955-1962, 1997. Disponível em: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:76a10663-8374-487b-8313-50054a86ddc6> Acesso em 20 de mai 2023.

SWISHER, R.; CARROLL, G. C. Fluorescein diacetate hydrolysis as an estimator of microbial biomass on coniferous needle surfaces. **Microbial ecology**, v. 6, p. 217-226, 1980. DOI: 10.1007/BF02010387

SZYMCZAK, L. S. *et al.* System diversification and grazing management as resilience-enhancing agricultural practices: The case of crop-livestock integration. **Agricultural Systems**, v. 184, p. 102904, 2020. DOI:10.1016/j.agsy.2020.102904

TEDESCO, M. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia, Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995

TETE, E.; VIAUD, V.; WALTER, C. Organic carbon and nitrogen mineralization in a poorly-drained mineral soil under transient waterlogged conditions: an incubation experiment. **European Journal of Soil Science**, v. 66, p. 427-437, 2015. DOI:10.1111/ejss.12234

TIMM, P. A. *et al.* Avaliação de cultivares de soja produzida em sistema camalhão em terras baixas. **Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, Gramado. Intensificação sustentável: anais. Gramado: Sosbai, 2017.

TRUONG, T. H. H.; MARSCHNER, P. Respiration, available N and microbial biomass N in soil amended with mixes of organic materials differing in C/N ratio and decomposition stage. **Geoderma**, v. 319, p. 167-174, 2018. DOI:10.1016/j.geoderma.2018.01.01

VAHL, L. C. Fertilidade de solos de várzea. In: GOMES, A. S., PAULETTO, E. A. (Eds). **Manejo do solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, p. 119-162, 1999.

VARGAS, L. K.; SELBACH, P. A.; SÁ, E. L. S. Imobilização de nitrogênio em solo cultivado com milho em sucessão à aveia preta nos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, p. 76-83, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000100012>

VIEIRA, R. F.. **Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 163 p.

WANG, W; LAI, D. Y. F; WANG, C; PAN, T; ZENG, C. Effects of rice straw incorporation on active soil organic carbon pools in a subtropical paddy field. **Soil and Tillage Research**, 152, 8-16. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.011>

WEINERT, C. *et al.* Legume winter cover crop (*Persian clover*) reduces nitrogen requirement and increases grain yield in specialized irrigated hybrid rice system.

European Journal of Agronomy, v. 142, p. 126645, 2023. DOI:10.1016/j.eja.2022.126645

WILLETT, I. R.; HIGGINS, M. L. Mineral nitrogen in soils undergoing irrigated rice-upland crop rotations. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 20, n. 107, p. 731-736, 1980. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/113290> Acesso em 20 de mai 2023.

XING, T. *et al.* Increasing soil microbial biomass nitrogen in crop rotation systems by improving nitrogen resources under nitrogen application. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 21, n. 5, p. 1488-1500, 2022. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(21\)63673-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(21)63673-0)

ZHENG, H. *et al.* Traditional symbiotic farming technology in China promotes the sustainability of a flooded rice production system. **Sustainability Science**, v. 12, p. 155-161, 2017. DOI:10.1007/s11625-016-0399-8

ZHU, GB, SINGH, B., ZHU, YG Oxidação anaeróbica de amônio em solos agrícolas - síntese e perspectiva. **Poluição Ambiental**, 244, 2019.127-134.