

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA**

Vicente José Laamon Pinto Simões
Engenheiro Agrônomo/UFRPE-UAST
Mestre em Produção Vegetal/UFRPE-UAST

**QUALIDADE FÍSICO-HÍDRICA E BIOQUÍMICA DO SOLO EM SISTEMA
INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA SOB DIFERENTES
ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO**

Porto Alegre

2023

Vicente José Laamon Pinto Simões

**QUALIDADE FÍSICO-HÍDRICA E BIOQUÍMICA DO SOLO EM SISTEMA
INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA SOB DIFERENTES
ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO**

Tese apresentada como requisito
para obtenção do Grau de Doutor
em Zootecnia, na Faculdade de
Agronomia, da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul.

**Orientador: Paulo César de
Faccio Carvalho**

**Porto Alegre
2023**

Vicente José Laamon Pinto Simões
Mestre em Produção Vegetal


TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de


DOUTOR EM ZOOTECNIA

Programa de Pós-Graduação em Zootecnia
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil


Aprovada em: 29.03.2023
Pela Banca Examinadora

 Documento assinado digitalmente
PAULO CESAR DE FACCIO CARVALHO
Data: 27/04/2023 13:19:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


PAULO CÉSAR DE FACCIO CARVALHO
PPG Zootecnia/UFRGS
Orientador

 Documento assinado digitalmente
AMANDA POSSELT MARTINS
Data: 27/04/2023 15:12:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Amanda Posselt Martins
UFRGS

 Documento assinado digitalmente
TALES TIECHER
Data: 27/04/2023 14:13:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Tales Tiecher
UFRGS

 Documento assinado digitalmente
MARCO AURELIO CARBONE CARNEIRO
Data: 27/04/2023 14:01:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Marco Aurélio Carbone Carneiro
UFLA

Homologado em: 07/06/2023
Por

Sergio Luiz Vieira

Assinado de forma digital por
Sergio Luiz Vieira
Dados: 2023.06.14 10:54:51 -03'00'

SERGIO LUIZ VIEIRA
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Zootecnia

 Documento assinado digitalmente
CARLOS ALBERTO BISSANI
Data: 16/06/2023 15:48:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade de Agronomia

CIP - Catalogação na Publicação

Pinto Simões , Vicente José Laamon
QUALIDADE FÍSICO-HÍDRICA E BIOQUÍMICA DO SOLO EM
SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA SOB
DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO / Vicente José
Laamon Pinto Simões . -- 2023.
152 f.
Orientador: Paulo César de Faccio Carvalho.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Zootecnia, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. intensificação sustentável. 2. qualidade do
solo. 3. integração agropecuária. 4. adubação de
sistema. I. de Faccio Carvalho, Paulo César, orient.
II. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pelo dom da minha vida, da minha família e dos meus amigos, com a graça de ter saúde e todo o necessário para ir em busca da realização dos meus sonhos.

À minha mãe Lucidalva Pinto Simões, e ao meu tio José Leonildo Pinto Simões, meus principais motivadores, por toda compreensão, apoio e incentivo durante todos esses anos em que estive longe de casa buscando a realização deste sonho. Obrigado por me ensinarem os valores morais indispensáveis a formação do ser humano.

À toda família Pinto Simões, meus tios e tias, primos e primas, por todo incentivo, apoio e suporte necessário para o cumprimento de mais esta etapa da minha vida. Vocês são o meu alicerce nos momentos bons e ruins. Obrigado por tudo!

Ao Prof. Dr. Maurício Luiz de Mello Vieira Leite, por ter sido a minha primeira inspiração na vida acadêmica, sendo responsável direto por me incentivar na pesquisa desde a graduação. Obrigado por sua amizade e todos os ensinamentos compartilhados.

Ao Prof. Dr. Eduardo Soares de Souza, por todos os ensinamentos, contribuições, amizade e por disponibilizar a estrutura do laboratório da Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada para realização de análises necessárias ao desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao Prof. Dr. Paulo César de Faccio Carvalho com orgulho pela enriquecedora orientação acadêmica. Agradeço pela confiança e oportunidade oferecida para realização deste sonho, por toda disponibilidade, apoio, colaboração e ensinamentos.

Aos colegas e membros do grupo de pesquisa em ecologia do pastejo (GPEP) e Grupo Interdisciplinar de Pesquisa em Bioquímica Ambiental (IRGEB), meus sinceros agradecimentos pela imprescindível colaboração, apoio e disponibilidade para realização desta pesquisa.

Este trabalho não seria possível sem vocês!!

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e aos funcionários da Estação Experimental Agrônômica da UFRGS pela estrutura e todo auxílio necessário para desenvolvimento deste trabalho. Obrigado!

À Profa. Dra. Amanda Posselt Martins, ao Prof. Dr. Tales Ticher e ao Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro, membros da banca examinadora, desde já, os meus agradecimentos por todas as contribuições.

À todos os meus amigos e amigas que por algum momento fizeram parte dessa caminhada e tornaram essa trajetória mais leve, em especial: George, Fabiana, Marcelo, Raweny, Jone, Lóren, Jenifer, Yanne, Lidiane, Jonatas, Mateus, Alexandra, Luciano, Larissa, Rafaela, Gentil, Jeferson, Bárbara, Daniel, Petiço, Renan, Victória, Ana Júlia, Rebeca e Leonie.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa, meus sinceros agradecimentos.

QUALIDADE FÍSICO-HÍDRICA E BIOQUÍMICA DO SOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA SOB DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO¹

Autor: Vicente José Laamon Pinto Simões

Orientador: Paulo César de Faccio Carvalho

RESUMO

O objetivo dessa tese foi examinar a associação entre a qualidade do solo nos sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) e a eficiência do uso de água e nutrientes com a adubação de sistema. No capítulo I foi apresentado o estado da arte e o referencial teórico que serviram como base para construção do modelo conceitual dos fatores que influenciam a eficiência de uso de nutrientes com adubação de sistema em SIPA. Nos capítulos II e III foram avaliadas as relações entre a qualidade estrutural do solo (II) e a interação entre os atributos físico-hídricos e bioquímicos (III) com a eficiência da adubação de sistema com fósforo e potássio em SIPA e em área sem pastejo. Foram avaliadas duas estratégias de adubação (adubação de sistema e adubação na lavoura) em esquema fatorial com dois sistemas de produção (sistema integrado de produção agropecuária e área sem pastejo) em delineamento de blocos casualizados com quatro (capítulo II) e três (capítulo III) repetições. No sistema exclusivo de produção de grãos, a soja foi cultivada seguida pelo azevém como cobertura do solo. No SIPA, o azevém era pastejado por ovinos. Na adubação da lavoura, foram aplicados fósforo e potássio no plantio da soja e nitrogênio no estabelecimento do azevém. Na adubação do sistema foram aplicados nitrogênio, fósforo e potássio durante o estabelecimento do azevém. Com base no índice de qualidade física do solo (capítulo II), a capacidade do solo em desempenhar suas funções físicas diminuiu de 94% no SIPA para 89% no sistema exclusivo de produção de grãos. Esse estudo forneceu a primeira evidência de que a maior qualidade estrutural dos solos em um SIPA favorece o rendimento das espécies vegetais em todas as fases de produção. No capítulo III o SIPA com adubação de sistema favoreceu o maior índice de qualidade do solo (IQS = 0,77) que integra funções bioquímicas e físico-hídricas, comparado a área sem pastejo com adubação de sistema (0,63) e ao SIPA com adubação na lavoura (0,64). Em reflexo aos resultados obtidos com o IQS, o SIPA com adubação de sistema, obteve as maiores produções primárias. As descobertas deste estudo evidenciaram que a eficiência da adubação de sistema em SIPA está fortemente relacionada com os atributos físico-hídricos e bioquímicos do solo.

Palavras chave: intensificação sustentável, eficiência no uso de nutrientes, serviços ecossistêmicos de pastagens, qualidade do solo

¹ Tese de Doutorado em Zootecnia - Produção Animal, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (149 p.) Março, 2023.

SOIL PHYSICAL-HYDRIC AND BIOCHEMICAL QUALITY IN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEM UNDER DIFFERENT FERTILIZATION STRATEGIES²

Author: Vicente José Laamon Pinto Simões

Advisor: Paulo César de Faccio Carvalho

ABSTRACT

The objective of this thesis was to examine the association between soil quality in integrated crop-livestock systems (ICLS) and the efficiency of water and nutrient use with the fertilization system. In chapter I, the state of the art and the theoretical framework that served as a basis for the construction of the conceptual model of the factors that influence the efficiency fertilization system in the crop-livestock integration were presented. In chapters II and III, the relationships between the soil structural quality (II) and the interaction between the physical-hydric and biochemical attributes (III) with the efficiency of the fertilization system with phosphorus and potassium in an ICLS were and pure crop system. Two fertilization strategies (system fertilization and crop fertilization) were evaluated in a factorial scheme with two production systems (ICLS and pure crop system) in a randomized block design with four (chapter II) and three (chapter III) repetitions. In the pure crop system, soybean was cultivated followed by ryegrass as soil cover. In the ICLS, ryegrass was grazed by sheep. In the crop fertilization strategy, phosphorus and potassium were applied in the soybean planting and nitrogen in the ryegrass establishment. In the system's fertilization strategy, nitrogen, phosphorus and potassium were applied during the establishment of ryegrass. Based on the soil physical quality index (chapter II), the capacity of the soil to perform its physical functions decreased from 94% in the integrated crop-livestock system to 89% in the pure crop system. This study provided the first evidence that the higher structural quality of soils in a ICLS favors the yield of plant species in all stages of production. In chapter III, the ICLS with fertilization system favored the highest soil quality index (SQI = 0.77) that integrates biochemical and physical-hydric functions, compared to the pure crop system with fertilization system (0.63) and the ICLS with crop fertilization (0.64). In reflection of the results obtained with the SQI, the ICLS with a fertilization system, obtained the highest primary productions. The findings of this study showed that the efficiency fertilization system in the ICLS is strongly related to the physical-hydric and biochemical attributes of the soil.

Keywords: sustainable intensification, nutrient use efficiency, pasture ecosystem services, soil quality

² Doctoral thesis in Animal Science, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (149 p.) March, 2023.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	14
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3 HIPÓTESE	32
4 OBJETIVOS	32
CAPÍTULO II	33
STRUCTURAL SOIL QUALITY AND SYSTEM FERTILIZATION EFFICIENCY IN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEM	34
1 Introduction.....	36
2 Material and methods	38
3 Results	46
4 Discussion	56
5 Conclusion	63
6 References	64
CAPÍTULO III	74
INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA E ADUBAÇÃO DE SISTEMA AUMENTAM A PRODUÇÃO PRIMÁRIA E MELHORAM ÍNDICES DE QUALIDADE DO SOLO	75
1 Introdução	76
2 Material e Métodos	78
3 Resultados	90
4 Discussão	104
5 Conclusão	111
6 Referências	112
CAPÍTULO IV	123
CONSIDERAÇÕES FINAIS	124
REFERÊNCIAS	125
APÊNDICE	133
Apêndice 1.....	134
Apêndice 2.....	135
VITA	152

LISTAS DE TABELAS

CAPÍTULO II	33
Table 1. Soil physical-hydric quality indicators	42
Table 2. Proposed critical limits and scoring curves according to the soil indicator.	44
Table 3. Analysis of variance of cropping systems (S) (ICLS vs pure crop system), fertilization strategy (F) (crop fertilization vs system fertilization), evaluation periods (T) (beginning, middle, end of pasture phase, and soybean harvest) and its effects on soil physical quality indicators	47
CAPÍTULO III	74
Tabela 1. Limites críticos e curvas de pontuação de acordo com o indicador de qualidade do solo	86
Tabela 2. Quadro de funções do solo e indicadores usados para desenvolver o índice de qualidade do solo.....	88
Tabela 3. Análise de variância das estratégias de adubação (F) (adubação de cultivo e adubação de sistema), sistemas de produção (S) (SIPA e área sem pastejo), períodos de avaliação (P) (transição lavoura-pastagem, meio do ciclo de pastejo e transição pastagem-lavoura) e seus efeitos nos indicadores de qualidade física e bioquímica do solo.....	91
Tabela 4. Valores médios dos indicadores de qualidade física e bioquímica do solo (0–10 cm de profundidade).....	92
Tabela 5 Coeficientes de correlação de Pearson (r) e probabilidade de erro (p- valor) entre os índices das funções do solo (Fi, Fii e Fiii) e o índice de qualidade do solo (IQS), produção total de forragem (PTF) e produtividade de soja (PS).	102

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I 14

Figura 1. Modelo conceitual dos fatores que influenciam a eficiência de uso de nutrientes com adubação de sistema em SIPA. Linhas sólidas representam influências diretas, linhas pontilhadas influências indiretas. CADP, capacidade de água disponível para planta. 31

CAPÍTULO II 33

Figure 1. (A) Bulk density (BD, Mg m^{-3}), (B) total porosity (TP, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), (C) plant-available water capacity (PAWC, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), (D) relative field capacity (RFC, dimensionless), (E) macroporosity (P_{mac} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) and (F) aeration capacity (AC, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) from 0 to 10 cm soil depth under the integrated crop-livestock system (ICLS) or pure cropping system (CS). Capital letters compare periods within each cropping system, except for AC (F) where underlined capital letters compare periods independently of the cropping system. Lowercase letters compare different cropping systems within each period. Means followed by the same letters do not differ by Tukey's test at $P < 0.05$ 49

Figure 2. Characteristic mean pore radius (λ_m) and quantity of hydraulically active pores (C_{λ_m}) from 0 to 10 cm soil depth in the integrated crop-livestock system (ICLS) or pure crop system (CS). Capital letters compare evaluation periods. Lowercase letters compare different cropping systems. Means followed by the same letters do not differ by Tukey's test at $P \leq 0.05$ 50

Figure 3. Scores of soil physical quality indicators from 0 to 10 cm soil depth over harvest year under the integrated crop-livestock system (ICLS) or pure crop system (CS) with system fertilization (SF) or crop fertilization (CF). Relative field capacity (RFC); plant available water capacity (PAWC). Capital letters compare the evaluation periods within each production system. Lowercase letters compare different production systems within each evaluation period. Means followed by the same letters do not differ by Tukey's test at $P \leq 0.05$ 52

Figure 4. Overall Soil Physical Quality Index ($\text{SPQI}_{\text{OVERALL}}$) scores in the integrated crop-livestock system (ICLS) or pure crop system (CS) with system

fertilization (SF) or crop fertilization (CF) (0 to 10 cm depth). The different letters are the significance level at 5% of the production system effect (ICLS versus CS).

..... 54

Figure 5. Total forage production and soybean yield in an integrated crop-livestock system (ICLS) or pure crop system (CS) with crop fertilization (CF) or system fertilization (SF). The different letters differed by the Tukey test at 5% of significance level. 55

CAPÍTULO III..... 74

Figura 1. Representação esquemática e cronológica das diferentes épocas de avaliações dos indicadores físico-hídricos e bioquímicos da qualidade do solo. P1 – transição lavoura-pastagem (julho), P2 – meio da fase pastejo (setembro), P3 – transição pastagem-lavoura (dezembro). 81

Figura 2. Pontuações das subfunções do solo (0 a 10 cm de profundidade) ao longo do ano-safra sob o sistema de integração lavoura-pecuária (SIPA) ou área sem pastejo (SP) com adubação de sistema (AS) ou adubação de cultura (AC). Biomassa microbiana (BM); Atividade enzimática (AE); Infiltração de água (IA); Armazenamento e disponibilidade de água (ADA); Capacidade de aeração do solo (CAS); Compactação do solo (CS); Estabilidade estrutural (ES); Condutividade hidráulica na saturação (K_s). Não significativo (ns). As letras maiúsculas comparam as estratégias de adubação em cada sistema de produção e letras minúsculas comparam diferentes sistemas de produção dentro de cada estratégia de adubação. As médias seguidas pelas mesmas letras não diferem pelo teste de Tukey em $P \leq 0,05$ 96

Figura 3. Pontuações das funções do solo (0 a 10 cm de profundidade) e do índice de qualidade do solo (IQS) ao longo do ano-safra sob o sistema de integração lavoura-pecuária (SIPA) ou área sem pastejo (SP) com adubação de sistema (AS) ou adubação de cultura (AC). Manutenção da microbiota e ciclagem de nutrientes (Fi); Infiltração, armazenamento e disponibilidade de água e ar (Fii); Sustentação do crescimento das plantas e resistência à degradação (Fiii). Índice de qualidade do solo (IQS). Não significativo (ns). As letras maiúsculas comparam as estratégias de adubação em cada sistema de produção e letras minúsculas comparam diferentes sistemas de produção dentro de cada

estratégia de adubação. As médias seguidas pelas mesmas letras não diferem pelo teste de Tukey em $P \leq 0,05$ 98

Figura 4. Produção total de forragem e produtividade da soja em sistema de integração lavoura-pecuária (SIPA) ou área sem pastejo (SP) com adubação de cultura (AC) ou sistema de adubação (AS). As letras maiúsculas comparam as estratégias de adubação em cada sistema de produção e letras minúsculas comparam diferentes sistemas de produção dentro de cada estratégia de adubação. As médias seguidas pelas mesmas letras não diferem pelo teste de Tukey em $P \leq 0,05$ 100

LISTA DE ABREVIATURAS

CAPÍTULO II

ICLS: Integrated crop-livestock system
CS: Pure cropping system
SF: System fertilization
CF: Crop fertilization
BD: Bulk density
TP: Total porosity
PAWC: Plant-available water capacity
RFC: Relative field capacity
P_{mac}: Macroporosity
AC: Aeration capacity
K_s: Saturated hydraulic conductivity
 λ_m : Characteristic mean pore radius
C _{λ_m} : Quantity of hydraulically active pores
SPQI_{OVERALL}: Overall soil physical quality index

CAPÍTULO III

SIPA: Sistema integrado de produção agropecuária
SP: Área sem pastejo
AS: Adubação de sistema
AC: Adubação da cultura
D_s: Densidade do solo
PT: Porosidade total
CADP: Capacidade de água disponível para a planta
CCR: Capacidade de campo relativa
P_{mac}: Macroporosidade
CA: Capacidade de aeração
K_s: Condutividade hidráulica saturada
IEE: Índice de estabilidade estrutural do solo
GCS: Grau de compactação do solo
CBM: Carbono da biomassa microbiana
NBM: Nitrogênio da biomassa microbiana
COT: Carbono orgânico total
BG: β : β -Glicosidase
ARS: Arilsulfatase
F(I): Manutenção da microbiota e ciclagem de nutrientes
F(II): Infiltração, armazenamento e disponibilidade de água e ar
F(III): Sustentação do crescimento das plantas e resistência à degradação
BM: Biomassa microbiana
AE: Atividade enzimática
IA: Infiltração de água
ADA: Armazenamento e disponibilidade de água
CAS: Capacidade de aeração do solo
IQS: Índice de qualidade do solo
CdS: Compactação do solo

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Os maiores rendimentos per capita e o aumento de 2,3 bilhões de pessoas na população mundial exigem o dobro da produção atual de alimentos até a metade deste século (GODFRAY et al., 2010; TILMAN et al., 2011; FAO, 2014). Isto representa um grande desafio ao setor agropecuário, uma vez que esse incremento terá de ser alcançado sem a expansão de novas áreas e com a mitigação dos impactos ambientais (MORAES et al., 2014a). Com as pressões políticas e econômicas cada vez maiores, o setor de produção de alimentos tornou-se mais especializado. No entanto, existem preocupações com sistemas agrícolas não conservacionistas, devido aos efeitos negativos sobre o meio ambiente (DURU et al., 2015). São várias as consequências dessa especialização, dentre tantas, destacam-se: a perda de diversidade, maior emissão de gases de efeito estufa (GEE), redução da qualidade da água, erosão e perda de qualidade dos solos (DURU et al., 2015; PEYRAUD et al., 2014).

Carvalho et al. (2010) destacaram a imprescindibilidade da prestação de serviços ecossistêmicos pelos novos modelos de produção agrícola, não somente a produção de alimentos em si. Nesse sentido, os sistemas de produção conservacionistas que integram lavouras e a atividade pecuária constituem uma estratégia consolidada para intensificação da produção de alimentos em harmonia com a preservação ambiental (BULLER et al., 2015). Os serviços ecossistêmicos promovidos por Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) foram destacados em diversos trabalhos (ANGHINONI et al., 2013; FRANZLUEBBERS et al., 2014; ASSMANN et al., 2015; BONETTI et al., 2019), que expuseram, dentre outros, a maior produção de grãos, maior qualidade da água, redução dos riscos de erosão por meio das maiores taxas de infiltração nos solos e a manutenção da fertilidade do solo através da maior eficiência na ciclagem de nutrientes.

Embora os SIPA sejam uma via concreta de intensificação sustentável, ainda há preocupações referentes a redução da produção agrícola devido a supostos impactos negativos na qualidade do solo ocasionados pela presença do animal (MARTINS et al., 2015). No entanto, sabe-se que com boa gestão e manejo adequado da carga animal não só são neutralizados esses efeitos como, também, a presença do animal proporciona maior qualidade físico-hídrica (BONETTI et al., 2019), biológica (CHÁVEZ et al., 2011) e química ao solo (MARTINS et al., 2014).

A integração do animal em pastejo com a agricultura impõe maior complexidade aos sistemas de plantio direto (SPD) convencionais (CARVALHO et al., 2018). Nos SIPA, os animais são considerados catalisadores do *continuum* solo-planta-atmosfera, capazes de alterar as taxas e os fluxos dos processos (ANGHINONI et al., 2013), promovendo mudanças quantitativas e qualitativas no material orgânico e, conseqüentemente, na mineralização e na liberação de nutrientes. Além disso, em sistemas pastoris, a desfolha estimula o crescimento radicular que, por sua vez, atua diretamente na estruturação do solo (AMBUS et al., 2018). Franzluebbbers et al. (2011a) sugerem que a maior agregação dos solos em SIPA pode melhorar a qualidade físico-hídrica dos solos, influenciando positivamente a conectividade dos poros. Ainda segundo esses autores, essas alterações possuem influência direta nos processos hidrológicos, com implicações no crescimento das plantas e nas emissões de GEE.

Dessa forma, considerando-se esse potencial, diversos trabalhos têm confirmado efeitos residuais da adubação em pastagens para culturas de grãos cultivadas em sucessão (SANDINI et al., 2011; ASSMANN et al., 2003). Tais experiências sugerem que a aplicação do conceito de adubação de sistema (ASSMANN et al., 2017), onde a reposição de nutrientes no solo é realizada na fase pastagem do SIPA, além de permitir a reutilização desses nutrientes na lavoura, podem reduzir o uso de insumos e mitigar possíveis contaminações ambientais.

Apesar dos numerosos trabalhos que abordam questões relativas aos SIPA (MORAES et al., 2014b), desconhecem-se estudos que associem a qualidade do solo com a eficiência da adubação de sistema e a possível influência desses atributos no tempo de reposição de nutrientes no solo. Assim, como o solo é a base para a produção animal e vegetal, torna-se essencial o estudo dos processos e dos agentes capazes de otimizar o uso de insumos, servindo de subsídio para a exploração racional e planejada, a fim de maximizar as sinergias intrínsecas da relação solo-planta-animal e aumentar a produção do sistema, com menos desperdício de insumos e contaminação ambiental. Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo examinar a associação entre a qualidade do solo e a eficiência da adubação de sistema em um SIPA (soja-ovinos) em SPD.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistemas integrados de produção agropecuária

2.1.1 Histórico e avanços conceituais

A integração do cultivo de plantas agrícolas e a produção animal é uma técnica de exploração usada há milhares de anos. Os primeiros registros da exploração, pelos humanos, de plantas e animais, originam-se desde os primórdios da revolução agrícola neolítica. Entretanto, somente no século XVI, na Europa, a partir da primeira revolução agrícola dos tempos modernos, registrou-se o planejamento funcional de um SIPA, em seu estado bruto, onde pastos de gramíneas e/ou leguminosas passaram a ocupar os intervalos entre culturas agrícolas destinadas a produção de grãos para consumo humano, resultando em sistemas ditos “sem pousio”. Esta prática, então, proporcionou a criação de animais, que usufruíam das espécies forrageiras como alimento e em troca forneciam a produção de esterco, a força de tração, bem como todos os outros produtos provenientes da atividade pecuária (e.g., lã, peles, carne, leite) (MAZOYER; ROUDART, 2010).

Desde as suas origens os SIPA são reconhecidos como uma estratégia eficiente na utilização dos recursos naturais. Segundo Mazoyer; Roudart, (2010), as técnicas de integração iniciais promoveram incrementos consideráveis nos rendimentos dos cereais e, inclusive, permitiu a introdução de espécies mais exigentes em fertilidade do solo, devido à maior disponibilidade de esterco animal usado como adubo orgânico. Porém, a justificativa dos acréscimos na produtividade das lavouras não se resumiam ao aumento da quantidade de esterco. Esses mesmos autores reconheceram que o cultivo de espécies forrageiras em intervalos agrícolas promovia menores perdas de nutrientes por lixiviação, uma vez que, as plantas forrageiras que substituíam o pousio exploravam a solução do solo e absorviam nutrientes, que antes eram perdidos.

No Brasil, desde os séculos XVII e XVIII, a integração da produção de gado e culturas agrícolas era tida como um sistema “peculiar e eficaz” (Linhares, 1995). No entanto, a contribuição do componente animal aos sistemas integrados nessa época, se limitava ao fornecimento de esterco para fertilização do solo. Os animais eram criados em confinamento através da utilização da

forragem produzida nos campos, sendo responsáveis pela produção de esterco que, posteriormente, seria recolhido, conservado e utilizado quando necessário para adubação dos solos (MAZOYER; ROUDART, 2010).

Os SIPA, conhecidos na literatura técnica como integração lavoura-pecuária (ILP), desde as suas origens estiveram em constante evolução. Apesar da integração ser uma técnica milenar, a sua exploração de forma deliberada não é algo tão antigo, diferentemente dos modelos iniciais que consistiam basicamente de rotações entre culturas agrícolas e pastagens (CARVALHO et al., 2014). Medeiros (1978) destacou que o princípio da ILP parte essencialmente da coexistência de culturas e gado na mesma área. Segundo Moraes et al. (2014c), este foi um dos primeiros avanços conceituais que contribuiu para o desenvolvimento do SIPA como sistema mais complexo que as rotação de culturas/pastagens. Ressaltaram ainda que a evolução mais substancial no conceito do SIPA surgiu pela necessidade de adaptação à tecnologia do plantio direto, na década de 1990, quando esses sistemas tiveram que se ajustar às práticas conservacionistas dos sistemas de semeadura direta.

O avanço conceitual que ofereceu para o mundo o uso dos SIPA baseado em práticas conservacionistas contribuiu significativamente para a adoção desses sistemas na atualidade, visto que a associação dessas práticas pode potencializar os efeitos benéficos da integração agropecuária, a ponto de permitir a intensificação da produção de alimentos em consonância com as novas exigências ambientais.

2.1.2 Importância no cenário atual

No cenário atual, as iniciativas conservacionistas estão ressurgindo gradualmente, como os sistemas de plantio direto e de integração agropecuária (FRASER et al., 2014; MORAES et al., 2014b; CARVALHO et al., 2014). Isto porque, na agricultura moderna, com pressões políticas e econômicas cada vez maiores, o setor de alimentos optou por simplificar os sistemas de produção, resultando na separação entre produção vegetal e animal (CARVALHO et al., 2014). Essa redução da diversificação das atividades ocasionou maior dependência de insumos externos (e.g., pesticidas e fertilizantes) e, ao mesmo tempo, reduziu a utilização dos insumos de manejo (e.g., controle biológico,

ciclagem de nutrientes e acúmulo de carbono) (HOUSE & BRUST, 1989), resultando em impactos nocivos ao ambiente.

Esse processo de modernização através da agricultura intensiva, promovida pela Revolução Verde (KIRSCHENMANN, 2007), provocou acréscimos nos rendimentos produtivos, principalmente nos países em desenvolvimento. No entanto, as consequências ambientais e sociais negativas eram desconsideradas ou não eram reconhecidas (FRANZLUEBBERS et al., 2011b). Kirschenmann (2009) e Steiner et al. (2009) expuseram que o setor de produção alimentos estaria vivenciando uma época altamente competitiva, em que os efeitos negativos sobre o ambiente e a sociedade, mesmo que explícitos, estariam sendo ignorados.

Os impactos negativos da agricultura intensiva na qualidade ambiental começaram a chamar atenção nos últimos anos (FRANZLUEBBERS et al., 2011b). Dentre as consequências, pode-se citar a perda de biodiversidade nos ecossistemas, poluição do ar e da água, diminuição das reservas de água subterrânea, emissão de GEE e degradação dos solos (DURU et al., 2015; PEYRAUD et al., 2014). Atualmente, esses sistemas não conservacionistas, com efeitos nocivos ao ambiente, são considerados inadmissíveis pela sociedade (LEMAIRE et al., 2014).

A forte dependência de insumos externos nos sistemas altamente especializados (LEMAIRE et al., 2015) comprometem a qualidade dos recursos hídricos devido ao uso indiscriminado de fertilizantes. Nesses sistemas, comumente os solos se encontram com excesso de fertilizantes químicos, que por não serem absorvidos em sua totalidade pelas plantas, ficam expostos ao processo de lixiviação direcionado aos lençóis freáticos e, conseqüentemente, há contaminação dos recursos hídricos. Esses fatores, associados à descompromissada utilização de recursos não renováveis vêm reduzindo a eficiência do uso de nutrientes na agricultura. Um exemplo disso é que nos últimos cinquenta anos a produção mundial de alimentos aumentou três vezes (LEMAIRE et al., 2015), enquanto a aplicação de adubos nitrogenados aumentou oito vezes (SUBBARAO et al., 2013).

Diante desse cenário de insustentabilidade associada aos sistemas altamente especializados, tornou-se imprescindível que os novos modelos produtivos estejam direcionados não somente para a produção de alimentos em

si, mas também para a prestação de serviços ecossistêmicos (CARVALHO et al., 2010). Os requisitos atuais para o setor agropecuário visam diminuir custos e, ao mesmo tempo, conservar o meio ambiente (KLUTHCOUSK; STONE, 2003). Nesse sentido, os SIPA ressurgem como estratégia para atingir metas de produtividade em consonância com a preservação do meio ambiente e favorecimento da economia (WRIGHT et al., 2011; BONAUDO et al., 2014; LEMAIRE et al., 2014; CARVALHO et al., 2018).

As áreas com SIPA representam uma das principais formas de uso da terra, cobrindo aproximadamente 25 milhões de km² no mundo (BELL; MOORE, 2012). Esses sistemas são responsáveis por alimentar 2 bilhões de pessoas e produzir 50% dos alimentos consumidos, o equivalente a aproximadamente 75% do leite, 65% da carne bovina e 55% da carne ovina (WRIGHT et al., 2011). Além da expressiva representatividade produtiva, os SIPAs vêm sendo reconhecidos por promover reduções nos custos de produção (RYSCHAWY et al., 2012) sem impactos negativos nos níveis de produtividade (BALBINOT JUNIOR. et al., 2009; MORAES et al., 2014a), resultando em maior retorno econômico ao produtor (OLIVEIRA et al., 2014). Dentre outras vantagens estão a melhoria das propriedades funcionais do solo (ANGHINONI et al., 2013; SALTON et al., 2014), aumento da ciclagem de nutrientes (ANGHINONI et al., 2013; ASSMANN et al., 2015) e maior eficiência na utilização dos recursos naturais (WRIGHT et al., 2011; MARTINS et al., 2014).

Apesar de todos esses benefícios, ainda há debates e preocupações referentes ao efeito do animal nos solos das áreas agrícolas. As principais discussões sobre essa temática referem-se a possíveis impactos negativos no crescimento e desenvolvimento das espécies vegetais em decorrência da compactação dos solos provocada pelo pisoteio dos animais. No entanto, sabe-se que com boa gestão e manejo adequado da carga animal não só são neutralizados esses efeitos, como também a presença do animal proporciona maior qualidade físico-hídrica (BONETTI et al., 2019), biológica (CHÁVEZ et al., 2011) e química aos solos (MARTINS et al., 2014). Os sinergismos intrínsecos da relação solo-planta-animal com foco nos efeitos do pastejo no solo será abordado em detalhes no próximo item (Item 4.2).

2.2 Sinergismos intrínsecos da relação solo-planta-animal: efeitos do pastejo no solo

A introdução dos animais em pastagens nas áreas agrícolas oferece diversas alterações no *continuum* solo-planta-atmosfera, sendo considerados como catalisadores de vários processos (ANGHINONI et al., 2013). Para Carvalho et al. (2018), as sinergias complexas e intrínsecas da relação solo-planta-animal oferecem um estado organizacional superior a esses agroecossistemas. Ainda, os efeitos únicos do processo de pastejo (pisoteio, desfolhamento e retorno de excretas) são o “motor” das mudanças, capazes de alavancar diversos benefícios ambientais através de melhorias na qualidade do solo.

Embora o animal seja o “motor” das mudanças em um SIPA, o solo é a base para a produção animal e vegetal, atuando como a “memória” do sistema, por capturar e armazenar as modificações impostas pelo manejo (ANGHINONI et al., 2013). Isto justifica a atenção especial crescente nos últimos anos das pesquisas para uma compreensão mais ampla dos impactos dos SIPA na qualidade do solo (ANGHINONI et al., 2013; MORAES et al., 2014a, b). Os principais indicadores da qualidade do solo podem ser resumidos em físico-hídricos (SPERA et al., 2012; ANGHINONI et al., 2015; CECAGNO et al., 2016; BONETTI et al., 2019); biológicos (SOUZA et al., 2010; CHÁVEZ et al., 2011; ANGHINONI et al., 2015) e químicos (MARTINS et al., 2014, b; SILVA et al., 2014a; MARTINS et al., 2016).

Apesar de o solo ser um componente bastante explorado nas pesquisas em SIPA, de forma geral esses estudos ainda estão sob uma abordagem multidisciplinar, como um conjunto de disciplinas que são tratadas separadamente. Este tipo de avaliação desconsidera as relações existentes e a atuação simultânea dos processos e agentes envolvidos no funcionamento de um SIPA, tornando os progressos científicos limitados e mesmo desconexos. Para a real compreensão do funcionamento do solo em SIPA, os estudos devem ter abordagens que incluam todas as inter-relações entre componentes biológicos, físico-hídricos e químicos do solo (ANGHINONI et al., 2013).

No SIPA, os animais em pastejo são responsáveis por conduzir mudanças nas propriedades funcionais do solo. Os efeitos únicos do pastejo,

especificamente a desfolhação e o retorno de excretas, oferecem novas rotas e fluxos de C capazes de potencializar a atividade dos microrganismos e favorecer o fluxo de água e nutrientes no solo através da melhor agregação e conectividade dos poros (FRANZLUEBBERS et al. 2011a; ANGHINONI et al., 2013). Nos próximos itens serão discutidos em detalhe os efeitos do pastejo na qualidade microbiológica (2.1) e físico-hídrica (2.2) dos solos e suas implicações na manutenção da fertilidade no tempo e na eficiência de uso de água e nutrientes pelas plantas.

2.2.1 Efeitos do pastejo na qualidade microbiológica do solo

A matéria orgânica do solo (MOS) desempenha papel fundamental na manutenção de múltiplas funções, devido a sua importância e influência em todas as características do solo, sendo considerada como o compartimento central do sistema e um dos principais atributos do solo (ANGHINONI et al., 2015; HU et al., 2018). A matéria orgânica possui frações de C com diferentes estabilidades e composições químicas, geralmente classificadas como fração lábil e recalcitrante. O carbono orgânico lábil (CL) é caracterizado por altas taxas de decomposição e curto período de permanência no solo, sendo a principal fração da MOS a atuar no fornecimento de nutrientes às plantas, energia e C aos microrganismos do solo. Já o carbono orgânico recalcitrante (CR) tem maior estabilidade e atua principalmente na estruturação do solo e no sequestro de carbono (YU et al., 2017; HU et al., 2018).

Os microrganismos, principalmente as bactérias, os fungos, os protozoários e as algas, constituem a biomassa microbiana (BMS) que, por sua vez, é considerada a fração viva de matéria orgânica, responsável pela decomposição dos resíduos orgânicos e liberação de nutrientes para as plantas, via reações bioquímicas e biológicas no solo que caracterizam o processo conhecido como ciclagem de nutrientes (BALOTA et al., 1998). Por centralizar vários processos, a BMS atua também nos ciclos do C, N, P e S no solo, podendo funcionar como reserva desses nutrientes (SOUZA et al., 2010).

A atividade dos microrganismos na BMS é influenciada pelo clima, principalmente, pela temperatura (WALLENSTEIN et al. 2010), pela umidade (BOROWIK et al., 2016), pela disponibilidade de nutrientes e pelo C orgânico do

solo (SOUZA et al., 2010). Além dos fatores ambientais, os fatores de manejo são capazes de alterar a qualidade (e.g., lábil e recalcitrante) e a quantidade dos resíduos vegetais que retornam ao solo podendo interferir na quantidade, diversidade e atividade dos microrganismos (SOUZA et al., 2010; CHÁVEZ et al., 2011; ANGHINONI et al., 2015). Segundo Cattelan; Vidor (1990) em situações que haja acréscimo de resíduos orgânicos no solo ocorre aumento populacional e da atividade dos microrganismos.

Em SIPA, a desfolhação e o retorno das excretas dos animais ao solo alteram a dinâmica do C orgânico, oferecendo novas rotas que aumentam a disponibilidade de C para os microrganismos do solo (WAKELIN et al., 2009). Segundo Souza et al. (2006a, b), o pastejo em intensidades moderadas promove o incremento de matéria orgânica de maior qualidade, ou seja, da fração lábil, que tende a influenciar positivamente os microrganismos do solo ao proporcionar energia e nutrientes para sua manutenção e atividade. Isto corrobora com as afirmações de Carvalho et al. (2010), ao considerarem os efeitos únicos do processo de pastejo como um “motor” das mudanças no sistema, promovendo transformações quantitativas e qualitativas no material orgânico.

As mudanças na qualidade dos compostos de carbono em SIPA são provocadas, diretamente, através do retorno de fezes e urina ao solo, ou indiretamente, por modificações nas concentrações de nutrientes nos tecidos vegetais, resultando em uma serapilheira de maior qualidade (BARDGETT; WARDLE, 2003). Nos SIPA, uma pequena fração dos nutrientes é retirada em produtos de origem animal (SILVA et al., 2014b) e em torno de 60 a 95% retornam ao solo como esterco e urina (TABOADA; RUBIO; CHANETON, 2011). Uma fração desses resíduos é de alta labilidade, com rápida decomposição, fornecendo energia e nutrientes aos microrganismos para mineralização da MOS e, finalmente, liberação de nutrientes (SOUSSANA; LEMAIRE, 2014).

Os animais regulam a quantidade de MOS por meio da indução de respostas fisiológicas nas plantas, como alterações na produção de biomassa total (parte aérea e raiz) e através da exsudação radicular. No curto prazo, a quantidade de MOS é influenciada principalmente pelos exsudatos radiculares, enquanto que em longo prazo a quantidade de MOS é afetada pelas mudanças induzidas pelo pastejo na produção de biomassa total (BARDGETT; WARDLE, 2003).

Nos ecossistemas pastoris a produção de biomassa é estimulada pelos efeitos do pastejo por meio de dois mecanismos. A desfolha induz a alocação das reservas das plantas na sua rebrota para recuperação dos tecidos consumidos (HILBERT et al. 1981, OESTERHELD; MCNAUGHTON 1991) e os nutrientes muitas vezes limitantes ao crescimento das plantas forrageiras, como o nitrogênio (N), estão disponíveis mais rapidamente nas excreções dos animais do que nos tecidos vegetais senescentes (SHARIFF et al. 1994, FRANK; GROFFMAN, 1998).

A quantidade de MOS que entra no sistema também é influenciada por maiores exsudações de formas altamente lábeis de carbono orgânico pelas raízes, e ao mesmo tempo pelo estímulo ao desenvolvimento radicular (SOUZA et al., 2010). Hamilton et al. (2008) observaram que a desfolha estimulou a exsudação de C das raízes em 1,5 vezes, resultando no aumento simultâneo da biomassa microbiana na rizosfera. Além disso, as raízes podem contribuir como reservatórios de C em solos de pastagens (FRANK; GROFFMAN, 1998). Nesse sentido, quanto maior a presença de raízes, maior será a liberação dos compostos orgânicos que servirão como fonte de C e energia aos microrganismos.

Hamilton; Frank (2001) relataram que a desfolha promoveu a exsudação radicular de carbono que de imediato foi assimilado pelos microrganismos, resultando em maior atividade destes, e consequente liberação de nutrientes no solo. Além disso, esses efeitos proporcionaram maior disponibilidade de N inorgânico no solo e maiores teores de N nas folhas, favorecendo a fotossíntese das plantas e, portanto, a produção de biomassa. Estas descobertas foram as primeiras evidências de que as plantas pastejadas estimulam a BMS e que há um retorno positivo pelo qual a presença do animal possibilita fluxos de energia e nutrientes que podem resultar em maior crescimento da planta.

As interações plantas-microrganismos beneficiam não somente a planta que foi desfolhada, mas também melhoram a disponibilidade de nutrientes para as plantas vizinhas (BARDGETT; WARDLE, 2003). Entretanto, os microrganismos também competem com as plantas por nutrientes (KAYE; HART, 1997). Este fato impede que os efeitos compensatórios da desfolha ocorram em solos de baixa fertilidade; nessas condições, a desfolha pode inclusive reduzir a população dos microrganismos do solo (BARDGETT; WARDLE, 2003).

Apesar dos efeitos do pastejo na qualidade microbiológica e suas implicações na fertilidade dos solos serem inquestionáveis, alguns autores (HAMILTON; FRANK, 2001) argumentam que há dificuldades em explicar os resultados promissores associados à presença dos animais em grandes escalas espaciais. As justificativas estão associadas à distribuição dos excrementos influenciarem apenas uma pequena proporção da área, geralmente concentrados em áreas de aguadas, repouso e saleiros (AUERSWALD et al., 2009; BAILEY et al., 2001; TATE et al. 2003; WHITE et al., 2001). Por outro lado, diferentemente da distribuição de excretas, a desfolha é um processo mais difuso e mais relacionado com as respostas positivas do pastejo em grandes escalas espaciais (HAMILTON; FRANK, 2001).

Conforme abordado no início deste item (4.2.1), o maior aporte da MOS mediada pela presença dos animais em SIPA, exerce uma função essencial na manutenção de todos os atributos do solo. Alguns autores (FRANZLUEBBERS, 2002; RAWLS et al., 2003) destacaram que há relações diretas entre o conteúdo de MOS com as propriedades físico-hídrica dos solos, como as taxas de infiltração e a quantidade de água disponível para as plantas. Nesse sentido, considerando as possíveis implicações dessas mudanças na produtividade primária e, conseqüentemente, na produção dos SIPA, serão detalhados no próximo item (4.2.2) os efeitos do pastejo na qualidade físico-hídrica dos solos.

2.2.2 Efeitos do pastejo na qualidade físico-hídrica do solo

Apesar de o SIPA ser considerado uma estratégia para intensificação sustentável, ainda há preocupações referentes a impactos negativos na produção agrícola associado a efeitos negativos do animal no solo (MARTINS et al., 2015). Na literatura referente aos impactos do pastejo no solo, comumente são identificados efeitos negativos como, por exemplo, o aumento da densidade e a redução do espaço poroso, principalmente a macroporosidade (MOREIRA et al. 2014). Tais experiências sustentam a preocupação com a inserção dos animais em pastagens integradas com áreas agrícolas. No entanto, na maioria dos casos, esses efeitos negativos restringem-se apenas à superfície do solo (0

até 5 cm de profundidade), que segundo Bell et al. (2011) é a camada em que ocorrem as maiores mudanças físicas do solo em SIPA.

Atualmente, sabe-se que com boa gestão e manejo adequado da carga animal, não só são neutralizados esses efeitos, como a presença do animal melhora os atributos físico-hídrico (BONETTI et al., 2019), biológicos (CHÁVEZ et al., 2011) e químicos do solo (MARTINS et al., 2014). Segundo Bonetti et al. (2019), o pastejo moderado melhorou a condição física do solo, a infiltração e a retenção de água. Esses autores relataram que o maior teor de água disponível no solo foi observado nessas condições. O gerenciamento adequado da carga animal mantém relação adequada entre os macro e microporos do solo, favorecendo boa aeração, infiltração e retenção de água em todo o perfil do solo (LIEBIG et al., 2011).

Os animais promovem melhoras nas propriedades físico-hídrica dos solos por meio dos incrementos na MOS (BARDGETT; WARDLE, 2003) e pelo estímulo ao desenvolvimento de raízes das plantas, resultante da indução de novos perfilhos (ANGHINONI et al., 2013). Franzluebbbers et al. (2011a) expuseram que o maior acúmulo de MOS pode influenciar positivamente a conectividade dos poros. Isso está relacionado à formação e à estabilidade de agregados no solo, proporcionada pela MOS. A conectividade dos poros é fundamental para o suprimento de água e nutrientes às plantas. Segundo Jin et al. (2013), para essa conexão os macroporos são essenciais para reduzir a resistência do crescimento radicular. Além disso, a agregação e a conectividade dos poros melhoram as taxas de infiltração de água no solo (BELL et al., 2014; AMBUS et al., 2018), reduzindo os riscos de erosão.

A MOS desempenha também a função de retenção de água. De acordo com Rawls et al. (2003), a MOS é importante para retenção de água em potenciais matriciais próximos à capacidade de campo. Contudo, à medida que o solo se torna mais seco, ou seja, mais próximo do ponto de murcha, a influência da MOS diminui. Bonetti et al. (2019) atribuíram a maior retenção de água em potenciais matriciais intermediários (entre -30 e -500 kPa) nos tratamentos com pastejo moderado ao maior acúmulo de MOS. Esses resultados evidenciam que os SIPA, por promoverem alta adição de MOS, podem influenciar diretamente o conteúdo de água disponível para as plantas.

Em sistemas pastoris a desfolha estimula o crescimento radicular que, por sua vez, atua diretamente na estruturação do solo (AMBUS et al., 2018). De acordo com Conte et al. (2011), os acréscimos na densidade das raízes em SIPA melhoram a agregação do solo. Esses resultados estão relacionados à importante contribuição das raízes no aporte de carbono no solo (WOHLENBERG et al., 2004; SALTON et al., 2008), que em regra são compostos mais recalcitrantes que o dossel e permanecem por mais tempo nos solos (DE NEERGAARD et al., 2002). Entretanto, as raízes influenciam a estrutura do solo também através dos exsudatos de compostos orgânicos (GYSSELS et al., 2005, BAIS et al., 2006), atuando como agentes ligantes eficazes entre partículas minerais e microagregados (POHL et al., 2009).

Segundo Carmona et al. (2018) as raízes contribuem para redução da densidade do solo. Dessa forma, o estímulo do crescimento das raízes em SIPA pode promover maior espaço poroso no solo e, conseqüentemente, maior capacidade de água disponível para as plantas. Além disso, as raízes atuam como barreira ao impacto do pisoteio animal, limitando as alterações físicas apenas na camada superficial do solo (FRANZLUEBBERS; STUEDEMANN, 2008).

Os resultados de Ambus et al. (2018) indicaram que em um SIPA, manejado com soja (*Glycine max*) no verão e aveia preta (*Avena strigosa*) + azevém (*Lolium multiflorum*) no inverno, o pastoreio contínuo por bovinos de corte promoveu acréscimo da compactação na camada superficial do solo; entretanto, ocorreu um efeito de mitigação durante o ciclo da soja. Esses resultados evidenciam uma capacidade de regeneração do solo em SIPA, que de acordo com Ambus et al. (2018) está associada a intensa atividade biológica, ciclos de umidificação e secagem, e contribuição das raízes do pasto na estruturação do solo. Segundo Zúñiga et al. (2015), a decomposição das raízes contribui também para melhorar a permeabilidade do solo à água e ao ar.

Ambus et al. (2018) destacaram que nas camadas abaixo da superfície (5-10 e 10-20 cm) as maiores condutividade hidráulicas saturadas foram nos solos com pastejo moderado e as mais baixas nos solos sem pastejo. Os autores atribuíram esses resultados à maior conectividade dos poros devido ao desenvolvimento e à distribuição mais homogênea das raízes nessas camadas de solo. Além disso, essas propriedades físico-hídricas do solo relacionadas à

dinâmica dos fluxos são bastante sensíveis a alterações no ambiente e por não representarem simplesmente o volume de poros, mas também a sua conectividade, podem ser utilizadas para avaliar o gerenciamento de sistemas complexos como SIPA.

Diante do exposto, considerando as particularidades benéficas oferecidas pela presença dos animais em SIPA, como a maior qualidade microbiológica (Item 4.2.1) e físico-hídrica dos solos (Item 4.2.2) e suas respectivas implicações na eficiência de uso de água e nutrientes pelas plantas, alguns trabalhos têm buscado explorar esse potencial através da aplicação do conceito de adubação de sistema (SANDINI et al., 2011; ASSMANN et al., 2003; ASSMANN et al., 2017). Tais experiências sugerem que a reposição de nutrientes no solo realizada na fase pastagem do SIPA, além de permitir a reutilização desses nutrientes na lavoura, pode reduzir o uso de insumos e mitigar possíveis contaminações ambientais.

No próximo item (4.3) será discutida a utilização da adubação de sistema em SIPA, assim como será apresentado um modelo conceitual sobre os fatores que influenciam a eficiência de uso de nutrientes nessas condições.

2.3 Adubação de sistema na integração agropecuária

Ainda são escassos os estudos a respeito de estratégias de fertilização em SIPA (MORAES et al., 2014b). Isto representa um forte entrave à exploração desses sistemas, uma vez que induz a manejos inadequados, principalmente, na fase pastagem. Em sucessões lavoura-pastagem conduzidos sob semeadura direta, é comum que a fertilização seja feita na lavoura, esperando que a pastagem seja atendida pela “adubação residual” da fase anterior. Dessa forma, a negligência com a adubação do pasto acaba por comprometer o desempenho da vegetação e, conseqüentemente, dos animais. Além de constituir um sério risco à capacidade conservacionista dessas áreas, visto que o esgotamento da fertilidade do solo pode ocasionar a degradação da pastagem e, em último caso, a degradação do solo.

A partir de resultados que demonstram que o animal exporta poucos nutrientes do sistema, e que os SIPA gerenciados adequadamente possuem grande potencial de ciclagem de nutrientes, alguns estudos (ASSMANN et al.,

2018; SANDINI et al., 2011) advogaram que a adubação na fase pastagem incrementa a produção de forragem, permitindo maior potencial de produção aos animais, com efeitos residuais dos nutrientes para a produção de grãos. A aplicação dessa estratégia de fertilização de sistema, com o manejo da adubação considerando todas as fases do SIPA, tem como objetivo principal explorar a máxima eficiência do uso de nutrientes através da ciclagem promovida pelos microrganismos do solo, reduzindo as entradas de insumos externos, minimizando as perdas e promovendo a manutenção da fertilidade do solo durante as fases do SIPA (ASSMANN et al., 2017).

Os motivos da adubação de sistema no SIPA foram destacados em diversos trabalhos (SANDINI et al., 2011; SOARES et al., 2015; ASSMANN et al., 2018) que expuseram, dentre outros, o incremento na produção animal devido à maior quantidade e qualidade da massa de forragem, a manutenção da cobertura do solo para atender os princípios do plantio direto, o maior aproveitamento dos nutrientes pela absorção das plantas e, conseqüentemente, reduções de perdas por lixiviação e contaminação dos recursos hídricos. Em regiões subtropicais onde os SIPA são caracterizados por terem a pastagem no inverno, Soares et al. (2015) destacaram outros benefícios referentes a essa estratégia de adubação, como os menores preços dos fertilizantes nitrogenados e as reduções de perdas de N por volatilização devido às temperaturas e radiações amenas nessa época do ano.

Sartor et al. (2014) relataram acréscimo na produtividade do milho com a adubação nitrogenada na pastagem. Segundo Galetto et al. (2014), a fertilização com P em SIPA na fase pastagem promove melhoras na qualidade da forragem e beneficia o rendimento do milho em sucessão. Esses resultados estão relacionados aos efeitos do pastejo na ciclagem desses nutrientes. De acordo com Costa et al. (2014), áreas pastejadas permitem o aumento da ciclagem do P e os estoques nas formas lábeis desse nutriente para posterior utilização das culturas de grãos. Além disso, a reciclagem do K é elevada em SIPA, relacionada principalmente com a intensidade de pastejo (MORAES et al., 2014a).

Apesar dos numerosos trabalhos que abordam questões relativas aos SIPA (MORAES et al., 2014b), desconhecem-se estudos que associam a qualidade do solo com a eficiência da adubação de sistema e a possível influência desses atributos no tempo de reposição de nutrientes no solo. Além disso, conforme

destacado por Moraes et al. (2014b), é necessária uma organização transdisciplinar na pesquisa sobre SIPA; entretanto, poucas levam em consideração essa abordagem, o que reflete a limitação da compreensão dos processos envolvidos na construção das propriedades emergentes.

Apenas através de pesquisas que incluam todas as inter-relações entre os componentes biológicos, físico-hídricos e químicos do solo é possível responder às questões: “Quais os processos e agentes envolvidos na eficiência do uso de água e nutrientes em SIPA? E qual é a implicação destes no tempo de reposição de nutrientes no sistema?”. Nesse contexto, torna-se fundamental o desenvolvimento de modelos conceituais que estabeleçam ao máximo as relações de causa-efeito, a fim de facilitar a compreensão dos processos e agentes envolvidos e suas respectivas alterações no sistema.

Um modelo conceitual (Figura 1) foi derivado da literatura revisada, considerando-se os fatores que influenciam a eficiência de uso de nutrientes com a adubação de sistema em SIPA. Conforme exemplificado na Figura 1, e discutida no decorrer desta revisão bibliográfica, a eficiência de uso de nutrientes com a adubação de sistema envolve fatores premeditados relacionados ao manejo, como o tipo de animal, a taxa de lotação e os níveis de nutrientes aplicados no pasto, assim como fatores de variação climática, como a umidade e temperatura. Além disso, na construção do modelo foram levados em conta as variáveis analisadas (Item 5), os mecanismos de ação (efeitos dos fatores premeditados) e os processos físico-hídricos e bioquímicos com implicações na eficiência do uso dos nutrientes, bem como as condições de equilíbrio do sistema que promovem os serviços ecossistêmicos de regulação e provisão.

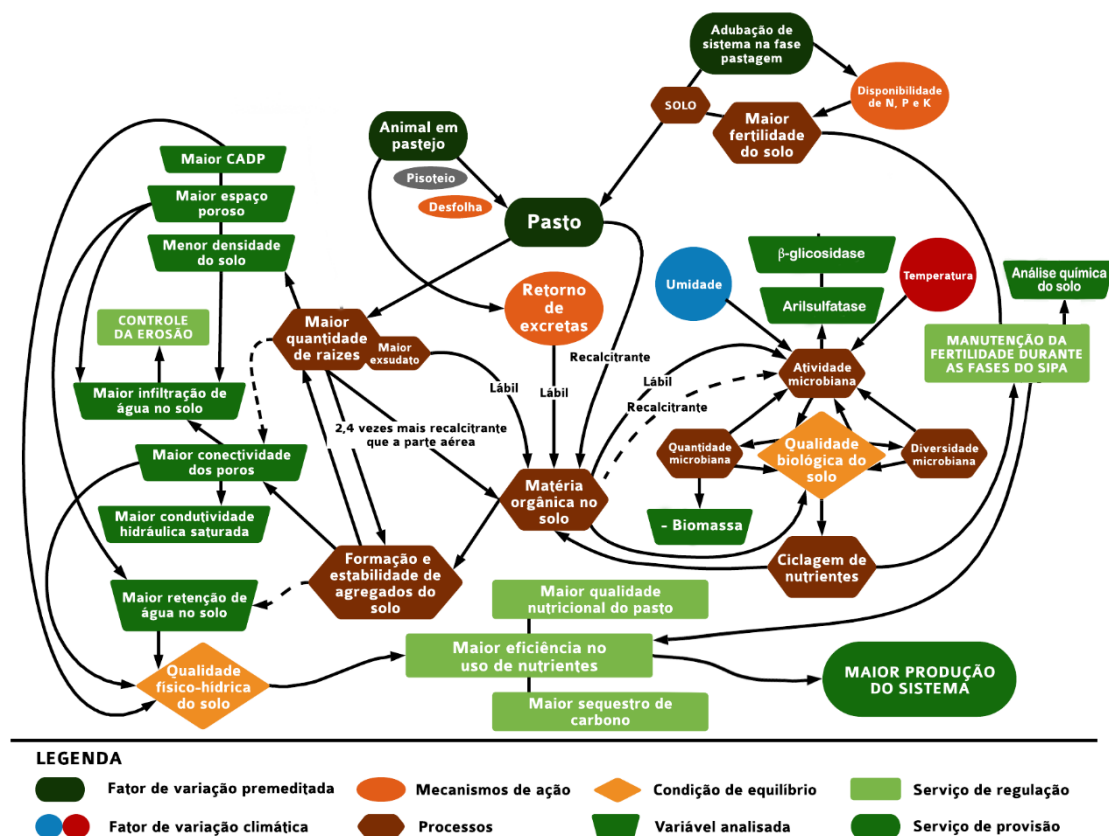


Figura 1. Modelo conceitual dos fatores que influenciam a eficiência de uso de nutrientes com adubação de sistema em SIPA. Linhas sólidas representam influências diretas, linhas pontilhadas influências indiretas. CADP, capacidade de água disponível para planta.

Estudos que abrangem todos esses fatores são importantes para a fundamentação científica, a fim de guiar recomendações sobre o manejo adequado da fertilização nos SIPA em consonância com as novas exigências sobre uma agricultura capaz de “produzir mais alimentos por unidade de área com menos necessidade de reposição de nutrientes e água” (MORAES et al., 2014b).

3. HIPÓTESES

Capítulo II) A eficiência da adubação de sistema em sistema integrado de produção agropecuária está relacionada com a qualidade estrutural do solo.

Capítulo III) A eficiência da adubação de sistema em sistema integrado de produção agropecuária é em decorrência da qualidade físico-hídrica e bioquímica do solo.

4. OBJETIVOS

Capítulo II)

a) Determinar as respostas estruturais do solo em áreas com pastejo (sistema integrado de produção agropecuária) e sem pastejo, sob diferentes estratégias de adubação (adubação de sistema e adubação da lavoura);

b) Examinar a associação entre a qualidade estrutural do solo e a eficiência da estratégia da adubação de sistema (P e K aplicados na fase de pastagem) em um sistema integrado de produção agropecuária.

Capítulo III)

Avaliar as relações entre a qualidade bioquímica e físico-hídrica do solo com a eficiência da adubação de sistema em sistema integrado de produção agropecuária.

CAPITULO II³

³ 2 Manuscript prepared and published (<https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108453>) according to the Agriculture Ecosystems & Environmental rules (Appendix 1).

1 **STRUCTURAL SOIL QUALITY AND SYSTEM FERTILIZATION**

2 **EFFICIENCY IN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEM**

3 Vicente José Laamon Pinto Simões^{a*}, Eduardo Soares de Souza^c, Amanda Posselt

4 Martins^b, Tales Tiecher^b, Carolina Bremm^a, Jenifer da Silva Ramos^a, Gustavo Duarte

5 Farias^a, Paulo César de Faccio Carvalho^a

6

7 ^aDepartment of Forage Plants and Agrometeorology, Integrated Crop-Livestock System

8 Research Group (GPSIPA), Federal University of Rio Grande do Sul, Av. Bento

9 Gonçalves 7712, Porto Alegre, RS 91540-000, Brazil; ^b Department of Soil Science,

10 Interdisciplinary Research Group on Environmental Biogeochemistry (IRGEB), Federal

11 University of Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves, Av. Bento Gonçalves 7712, Porto

12 Alegre, RS 91540-000, Brazil; ^c Postgraduate Program in Plant Production, Federal

13 Rural University of Pernambuco/ Academic Unit of Serra Talhada, PE, Brazil.

14

15 ***Corresponding author:**

16 Vicente José Laamon Pinto Simões.

17 **E-mail address:** laamoneng.agro@gmail.com

18 **Postal Address:**

19 Av. Bento Gonçalves 7712

20 Porto Alegre, RS – Brazil

21 ZIP Code 91540-000

22

23 **ABSTRACT**

24 The nutrient use efficiency in integrated crop-livestock systems under system fertilization
25 may be related to soil structural variations caused by grazing. These hypothetical cause-
26 effect relationships are not known, which reflects a limited understanding of the
27 underlying processes. This study evaluated the association between soil structural quality
28 and system fertilization efficiency of phosphorus and potassium in an integrated crop-
29 livestock system and a pure crop system. The treatments were two fertilization strategies
30 (system fertilization and crop fertilization) in a factorial scheme with two production
31 systems (an integrated crop-livestock system and a pure crop system) distributed in a
32 randomized block design with four replicates. In the pure crop system, soybean was
33 grown followed by Italian ryegrass as a non-grazed cover crop. In the integrated crop-
34 livestock system, the ryegrass was grazed by sheep. In the crop fertilization strategy,
35 phosphorus and potassium were applied at the soybean planting, and nitrogen in the
36 ryegrass establishment. In the system fertilization strategy, nitrogen, phosphorus, and
37 potassium were applied during the establishment of ryegrass. Soil physical quality indices
38 were calculated for the beginning, middle, and end of the pasture phase (2020) and at the
39 soybean harvest (2021). Forage and soybean production were also evaluated. Based on
40 the soil physical quality index, the soil's ability to perform its physical functions
41 decreased from 94% under an integrated crop-livestock system to 89% under a pure crop
42 system. The results indicated higher total forage production (36%) and soybean yield
43 (13%) in the system fertilization strategy as compared to the crop fertilization strategy.
44 Moreover, the integrated crop-livestock system produced more forage (31%) and soybean
45 grains (15%) than the pure crop system. The study provides the first evidence that higher
46 structural quality of soils in an integrated crop-livestock system favors crop yields at all
47 stages of production. However, the nutrient use efficiency in system fertilization is only
48 partially explained by the soil's physical quality.

49

50 **KEYWORDS:** Mixed systems; soil physical functions; soil quality; fertilization;
51 grazing.

52

53

54 **1. Introduction**

55 The population expansion associated with higher per capita incomes will require
56 double the current food production by the middle of this century (FAO, 2014; Mottet et
57 al., 2017). This scenario historically represents one of the biggest challenges for the
58 agricultural sector, since this increase will have to be achieved without expanding new
59 areas and with minimal environmental impact (Moraes et al., 2014a). In modern
60 agriculture, the food sector chose to become more specialized and simplified production
61 systems by disconnecting plant and animal production (de Faccio Carvalho et al., 2014).
62 However, the specialization of activities resulted in greater dependence on external inputs
63 (eg, pesticides and fertilizers) and, at the same time, reduced the use of management
64 inputs (e.g., biological control, nutrient cycling and carbon accumulation) (House and
65 Brust, 1989), resulting in harmful impacts on the environment.

66 In view of this scenario, conservative production systems that integrate crops and
67 livestock reemerge as a consolidated strategy for intensifying food production in harmony
68 with environmental concerns (Buller et al., 2015). The ecosystem services promoted by
69 Integrated Crop-Livestock System (ICLS) have been reported in several studies
70 (Anghinoni et al., 2013; Franzluebbbers et al., 2014; Assmann et al., 2015; Bonetti et al.,
71 2019) highlighting greater grain production, better water quality, higher soil water
72 infiltration rates and, consequently, reduced erosion risks, and the maintenance of soil
73 fertility through greater nutrient cycling.

74 Although ICLS is considered a strategy for sustainable intensification, there are
75 still concerns related to the reduction of agricultural production due to the supposed
76 negative impacts of the animal on soil quality (Martins et al., 2015). The literature
77 referring to the impacts of grazing is controversial. Negative effects are occasionally
78 registered in post-grazing conditions, such as increased soil density and reduced pore

79 space, mainly macroporosity (e.g., Moreira et al., 2014). However, assessments of a single
80 period do not consider the dynamics of the intrinsic processes of the soil-plant-animal
81 matrix. Furthermore, it is known that good pasture management and proper grazing
82 pressure cannot only neutralize these negative effects but even improve the physical
83 (Bonetti et al., 2019), biological (Chávez et al., 2011) and chemical (Martins et al., 2014)
84 soil properties.

85 The inclusion of grazing animals in crop production systems promotes
86 improvements in the physical-hydric properties of soils through increases in soil organic
87 matter (Bardgett and Wardle, 2003) and by stimulating the development of plant roots,
88 resulting from the induction of tillering (Anghinoni et al., 2013). Controlled defoliation
89 caused by grazing and excreta return offer new nutrient fluxes in the system. In addition,
90 the process stimulates root growth by rearranging soil particles, favoring the flux of water
91 and nutrients through better aggregation and connectivity of soil pores (Franzluebbers et
92 al. 2011; Anghinoni et al., 2013). However, depending on soil texture and climate (Van
93 Haveren., 1983; Taboada et al., 2011), the soil structural changes caused by grazing can
94 be of low persistence (Ambus et al., 2018; Bonetti et al., 2019) requiring assessments
95 over time to accurately quantify cause-and-effect relationships.

96 In crop-pasture successions, fertilization is generally performed only in the crop
97 establishment. Consequently, the nutrients for the pasture phase are based on the “residual
98 fertilization” of the previous crop. Neglecting pasture fertilization ends up compromising
99 the performance of the sward and, consequently, the animal's performance. Considering
100 the low extraction of nutrients in animal products and the benefits due to the presence of
101 animals in ICLS, studies sought to explore this potential (Assmann et al., 2003; Sandini
102 et al., 2011; Assmann et al., 2017) through the purpose of the system fertilization strategy
103 concept (see Farias et al., 2020). These experiences suggest that the replacement of soil

104 nutrients carried out in the pasture phase of the ICLS, in addition to allowing their
105 recycling, can reduce the nutrient inputs and mitigate eventual environmental harm.

106 Despite the numerous subjects already investigated related to ICLS (Moraes et al.,
107 2014b), studies that associate the soil structural quality with fertilization strategies are
108 lacking. Furthermore, few studies explore the temporal dynamics of the processes
109 involved in complex responses of the interaction between soil, plants, and animals. So,
110 the present study aims to: (a) determine soil structural responses in integrated crop-
111 livestock system and pure crop system, under different fertilization strategies (system
112 fertilization and crop fertilization); (b) examine the association between soil structural
113 quality and the efficiency of the system fertilization strategy (P and K applied in the
114 pasture phase) in a crop-livestock integration and a pure crop system. To this end, soil
115 physical-hydric indicators sensitive to management changes (Reynolds et al., 2009;
116 Castellini et al., 2016; Cherubin et al., 2016b) were combined into a single soil physical
117 quality index.

118

119 **2. Material and methods**

120 **2.1 Site, climate, and soil description**

121 The experiment was established at the Agronomic Experimental Station of the
122 Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), in Eldorado do Sul, Rio Grande do
123 Sul state, Brazil (latitude 30°05'22" S and longitude 51°39'08" W and altitude 46 m).
124 According to Köppen's classification, the region's climate is humid subtropical "Cfa".
125 During the experimental period, the average air temperature was 20°C and the
126 accumulated rainfall was 1443 mm. The soil is an Acrisol presenting at the beginning of
127 the experiment (0–20 cm layer) 8.1 g kg⁻¹ of organic carbon, potential of hydrogen (pH)
128 in water (1:1, v/v) of 4.4, 1.9 and 0.6 cmol_c dm⁻³ of exchangeable calcium (Ca) and

129 magnesium (Mg) (extracted with potassium chloride (KCl) 1.0 mol L⁻¹), 7.8 cmol_c dm⁻³
130 of cation exchange capacity at pH 7.0 (CEC_{pH 7.0}), 33 and 26% of base and aluminium
131 (Al) saturation, and 51 and 105 mg dm⁻³ of available phosphorus (P) and potassium (K)
132 (extracted by Mehlich-1 solution). The textural class is sandy loam (160, 260, and 580 g
133 kg⁻¹ of clay, silt, and sand, respectively).

134

135 **2.2. Experimental design and treatments**

136 The experiment was settled in 2017 in an experimental area of 4.4 ha, split into 16
137 experimental plots (paddocks) varying between 0.23 and 0.32 ha. It was arranged in a
138 factorial scheme 2 × 2 with four replicates in a completely randomized block design.
139 Treatments refer to two cropping systems under no-tillage and two fertilization strategies.
140 The cropping systems are (i) ICLS – soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] in the spring-
141 summer (crop phase, November-April) in rotation with ryegrass (*Lolium multiflorum*
142 Lam.) grazed by sheep during autumn-winter (pasture phase, May-October); and (ii) pure
143 crop system (CS) – soybean in the crop phase and non-grazed Italian ryegrass as a cover
144 crop in the pasture phase. The fertilization strategies are: (i) conventional fertilization -
145 with the P and K applied at the soybean sowing (November); and (ii) system fertilization
146 - with P and K applied at the pasture establishment (May). In both fertilization strategies,
147 N fertilization was performed only once in all treatments in the establishment of ryegrass,
148 at a rate of 150 kg N ha⁻¹, in the form of urea. Fertilization with P and K was performed
149 at doses of 15 and 42 kg ha⁻¹, respectively, following technical recommendations (CQFS-
150 RS/SC, 2016). All data analyzed were assessed along a complete ryegrass – soybean
151 succession, between May/2020 and May/2021.

152

153

154 **2.2.1 Management of cropping phases**

155 **2.2.1.1 Pasture phase management**

156 After the soybean harvest (April 2020), 25 kg of viable pure seed per ha of Italian
157 ryegrass was sown. In the pure crop system plots, the ryegrass has been grown as a cover
158 crop, while the ICLS plots, ryegrass were grazed by Corriedale sheep testers, with
159 approximately 32 ± 2.64 kg of live weight and 10 months old. The grazing period was
160 from July to October, totaling 120 days. The continuous stocking method with variable
161 stocking rate using the "put-and-take" technique (Mott and Lucas, 1952) was used to
162 maintain an average sward height of 15 cm, which is considered the canopy structure that
163 maximizes animal production ["Rotatinuous" concept, by Carvalho (2013)].

164 **2.2.1.2. Soybean phase management**

165 After the pasture phase, ryegrass was desiccated with Glyphosate (3 L ha^{-1}).
166 Subsequently, soybean seeds (cultivar - TMG 7063 IPRO) were inoculated and sown
167 (November 4th, 2020) 45 cm between rows aiming at a density of 255.000 plants ha^{-1} .
168 Crop growth was monitored weekly to control pests and diseases. Whenever necessary,
169 applications of chemicals (herbicides, insecticides, and fungicides) were carried out in
170 accordance with technical recommendations. Soybean was harvested on May 5th, 2021.

171 **2.3. Soil sampling and soil physical measurements**

172
173 To evaluate the physical-hydric properties, soil samples were taken from 0-10 cm,
174 considering the layer that stores and controls several environmental and agronomic
175 processes, such as germination, the initial growth of seedlings, infiltration, and/or runoff
176 (Reynolds et al., 2009). A soil sample composed of five disturbed subsamples (0-10 cm
177 depth) was randomly collected per plot (paddocks) to determine the soil particle size
178

179 distribution. The samples were wrapped in plastic and stored until laboratory analysis
180 according to Teixeira et al. (2017).

181 Infiltration tests were carried out in the following periods: P1 - at the beginning
182 of the pasture phase (2020/July); P2 - in the middle of the pasture phase (2020/August);
183 P3 - at the end of the pasture phase (2020/October); and P4 - right after the soybean
184 harvest (2021/April). All 64 infiltration tests were concentrated near the center of the plots
185 (paddocks) to avoid possible border effects. The tests were performed using a cylinder
186 with an internal diameter of 15 cm, inserted at a depth of about 10 mm to avoid lateral
187 water loss (Lassabatère et al., 2006).

188 In each evaluation, eight soil samples were taken per treatment, four deformed
189 samples to determine initial moisture (θ_0) and four undisturbed samples (10 cm diameter
190 \times 10 cm long) to evaluate dry soil bulk density and final moisture (θ_s), adopting θ_s equal
191 to total porosity. After collection, samples were stored to prevent water loss or gain. Then,
192 they were taken to the laboratory, where they were weighed and put into an oven at 105 °C
193 until a constant weight was achieved, according to Teixeira et al. (2017).

194 The Beerkan method was used to characterize soil physical-hydric conditions
195 (Lassabatère et al., 2006). This method simultaneously estimates the parameters of water
196 retention (van Genuchten, 1980, Eq.1) and the hydraulic conductivity of the soil (Brooks
197 and Corey, 1964, Eq.2) with the Burdine condition (Burdine, 1953):

$$198 \quad \theta(h) = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} \quad \text{with} \quad m = 1 - \frac{2}{n} \quad (\text{Eq.1})$$

$$199 \quad K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad \text{with} \quad \eta = \frac{2}{mn} + 2 + p \quad (\text{Eq.2})$$

200 where θ is the volumetric soil water content [$L^3 L^{-3}$]; θ_r and θ_s are the residual and
201 saturated volumetric soil water contents [$L^3 L^{-3}$], respectively; h is the soil water pressure
202 head [L]; h_g [L] is the scale value of h ; n , m , and η are shape parameters; p is the parameter

203 of tortuosity set equal to 1 (Burdine, 1953); K_s is the saturated hydraulic conductivity of
 204 the soil [$L T^{-1}$]. θ_r is assumed to be zero; θ_s was measured from soil samples collected at
 205 the end of the infiltration test.

206 The Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration
 207 experiments (BEST) algorithm estimates shape parameters (n and η) assuming similarity
 208 between the particle-size distribution and water retention functions. The scale parameters,
 209 h_g , K_s , and θ_s , were determined by infiltration analysis, using the analytical formula
 210 defined by Haverkamp et al. (1994) for 3D cumulative infiltration $I(t)$ and infiltration rate
 211 $q(t)$, described by the transient and steady-state equations, respectively [see Lassabatère
 212 et al. (2006) for more details]. BEST-Slope was used based on its best performance in
 213 fitting the transient cumulative infiltration model to the data from all infiltration tests
 214 ($N=64$).

215 To assess the soil physical-hydric quality, nine indicators selected from the
 216 literature were used (Iovino et al., 2016; Mubarak et al., 2009; Reynolds et al., 2007,
 217 2009; Topp et al., 1997; Watson and Luxmoore, 1986), as shown in Table 1.

218

219 **Table 1.** Soil physical-hydric quality indicators.

Indicator	
Bulk density (BD - $Mg m^{-3}$)	
Total porosity (TP - $m^3 m^{-3}$)	
Saturated hydraulic conductivity (K_s - mm^{-1})	
Plant-available water capacity (PAWC - $m^3 m^{-3}$)	$\theta_{FC} - \theta_{PWP}$
Relative field capability (RFC - DN)	$\frac{\theta_{FC}}{\theta_s}$
Macroporosity (P_{mac} - $m^3 m^{-3}$)	$\theta_s - \theta_M$

Aeration capacity (AC - $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	$\theta_S - \theta_{FC}$
Characteristic mean pore radius (λ_m - mm)	$\frac{\sigma_w}{\rho_w g \alpha_h}$
Number of hydraulically active pores (C_{λ_m} - number m^2)	$\frac{8\mu K_s}{\rho_w g \pi \lambda_m}$

220 θ_S , saturated water content in the soil; θ_M , soil matrix water content ($h = -0.1 \text{ m H}_2\text{O}$);
 221 θ_{FC} , soil water content at field capacity ($h = -1 \text{ m H}_2\text{O}$); θ_{PMP} , water content in the soil at
 222 the point of permanent wilt ($h = -150 \text{ m H}_2\text{O}$); σ_w , soil-water surface tension (0.0719 N
 223 m^{-1}), ρ_w , density of water (10^3 kg m^{-3}), g , gravitational acceleration (9.81 m s^{-2}), α_h ,
 224 macroscopic capillary length calculated from the scale parameter h_g as $\alpha_h = h_g$
 225 (Haverkamp et al., 2006; Souza et al., 2014; Castellini et al. 2016); μ , water dynamic
 226 viscosity ($0.00089 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$).

227

228 **2.4. Soil physical quality index (SPQI)**

229 SPQI was developed in three steps, as described by Cherubin et al. (2016a;
 230 2016b). The first step consisted of selecting the indicators. Based on published literature,
 231 seven indicators were selected (BD, TP, PAWC, RFC, P_{mac} , AC, and K_s) as a minimum
 232 data set to determine the effects of cropping systems on the soil's physical functions. For
 233 the development of the indices, the characteristic mean pore radius and the number of
 234 hydraulically active pores were not considered due to the absence of reference values in
 235 the literature. However, considering the ability to represent the characteristics of the soil
 236 matrix flows, these indicators were explored independently of the indices.

237 In the second step, the values of the measured indicators were transformed using
 238 non-linear scoring functions. The indicators were scored at a unitless value ranging from
 239 0 to 1 using one of the following curves: "more is better" (upper asymptote sigmoid
 240 curve), "less is better" (lower asymptote sigmoid curve) and "optimal midpoint" (gaussian
 241 curve). The nonlinear equations 3 and 4 were used for the "more is better" and "less is

242 better” scoring curve shapes, respectively. For the “optimal midpoint” curve, equations 3
 243 and 4 were used together in the increasing and decreasing parts of the curve.

$$244 \quad \text{Score} = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{B - UB}{x - UB}\right)^S\right]} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$245 \quad \text{Score} = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{B - LB}{x - LB}\right)^S\right]} \quad (\text{Eq. 4})$$

246 where, *Score* is the unitless value of the soil indicator which ranges from 0 to 1, *a* is the
 247 maximum score, which was equal to 1 in this study, *B* is the baseline value of the soil
 248 indicator Where the score equals 0.5, *LB* is the lower threshold, *UB* is the upper threshold,
 249 *x* is the measured soil indicator value, and *S* is the slope of the equation set to -2.5.

250 The threshold and baseline values for each soil indicator were defined using
 251 literature references, as shown in Table 2.

252

253 **Table 2.** Proposed critical limits and scoring curves according to the soil indicator.

Indicator	Unit	Lower threshold	Lower baseline	Upper threshold	Optimum point	Scoring curve
BD [♦]	Mg m ⁻³	1.5	1.65	1.8	-	Less is better
TP [♦]	m ³ m ⁻³	0.2	0.35	0.5	-	More is better
PAWC [♦]	m ³ m ⁻³	0.1	0.15	0.2	-	More is better
RFC [♦]	DN	-	0.6 and 0.7	-	0.65	Optimum
P _{mac} [♦]	m ³ m ⁻³	-	0.04	0.07	-	More is better
AC [♦]	m ³ m ⁻³	-	0.1	0.14	-	More is better
K _s [♦]	mm ⁻¹	-	0.001 and 0.1	-	0.005 ≤ K _s ≤ 0.05	Optimum

254 [♦]Reichert; Reinert; Braida (2003) and Reichert et al. (2009); [♦]Cherubin et al. (2016a);
 255 [♦]Reynolds et al. (2007; 2009). BD, bulk density (Mg m⁻³); TP, total porosity (m³ m⁻³);
 256 PAWC, plant-available water capacity (m³ m⁻³); RFC, relative field capacity (DN,
 257 dimensionless); P_{mac}, macroporosity (m³ m⁻³); AC, aeration capacity (m³ m⁻³); K_s,
 258 saturated hydraulic conductivity (mm s⁻¹).

259

260 In the third step, the indicator scores were integrated into a soil physical quality
 261 index using the simple additive method (Eq. 5), as described by Cherubin et al. (2016a).

$$262 \quad SPQI = \sum_{i=1}^n \frac{Si}{n} \quad (\text{Eq. 5})$$

263 where, Si is the score of the indicator and n is the number of indicators integrated into the
 264 index.

265 For each evaluation period (beginning, middle, end of the pasture phase and after
 266 soybean harvest), a soil physical quality index was calculated and, subsequently, through
 267 the average of these indices, an overall index of soil physical quality ($SPQI_{\text{OVERALL}}$) was
 268 determined.

269

270 **2.5 Primary production assessments**

271 The total forage production (kg ha^{-1} of dry matter - DM) was calculated as the
 272 total accumulated biomass in pure crop system plots, or the sum of the forage mass on
 273 the first day of grazing and the daily forage accumulation rates during the pasture phase
 274 for ICLS plots. Daily forage accumulation rates were estimated in ICLS plots every 28
 275 days by grazing exclusion cages, following a standard protocol described by Farias et al.
 276 (2020). Soybean yield (kg ha^{-1}) was determined through 4 random subsamples (per plot)
 277 of one linear meter, at full grain maturity with 13% moisture.

278

279 **2.6. Data analyses**

280 The assumptions of the analysis of variance (ANOVA) were reached (normality
 281 by the Shapiro-Wilk test ($P > 0.05$), homogeneity of variance by the Bartlett test ($P > 0.05$),
 282 and residual visual analysis). When necessary, the database was transformed by raising

283 the variable to the power of lambda. The appropriate lambda value was obtained by
284 conducting a Box-Cox transformation analysis.

285 ANOVA was performed at a significance level of 5% ($P < 0.05$) using a mixed
286 model by the LMER function of the lme4 package in the R software (R Core Team, 2013).
287 Soil variables and the soil physical quality index per period were considered fixed effects:
288 the cropping system (ICLS vs. pure crop system), the fertilization strategy (crop
289 fertilization vs. system fertilization), the evaluation period (beginning, middle, end of
290 pasture phase and right after soybean harvest) and their respective interactions. For these
291 variables, the plots (paddocks) represented the random effect. The cropping system, the
292 fertilization strategy, and its interaction were considered fixed effects, and the block as a
293 random effect on forage production, soybean yield, and the overall soil physical quality
294 index. When differences were detected, means were compared by the Tukey test.
295 Regression analysis and Pearson (r) correlation at 5% level were performed among
296 $SPQI_{OVERALL}$, forage, and soybean production.

297

298 **3. Results**

299 **3.1 Soil physical quality indicators**

300 The best performances in terms of fitting the transient cumulative infiltration
301 model to the experimental data were obtained with the BEST-slope. All infiltration tests
302 ($N = 64$) with BEST-slope were successfully performed, that is, they had 100%
303 performance and produced positive saturated hydraulic conductivity values. Among the
304 variables used in $SPQI$ and on all measurement dates, saturated hydraulic conductivity
305 showed the greatest coefficient of variation ($CV = 60\%$). Saturated hydraulic conductivity
306 is reported to have the greatest statistical variability between different hydrological
307 properties of the soil (Mubarak et al., 2009; Deb and Shukla, 2012). All other variables

S x T	**	**	**	*	*	ns	ns	ns	*
F x S x T	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

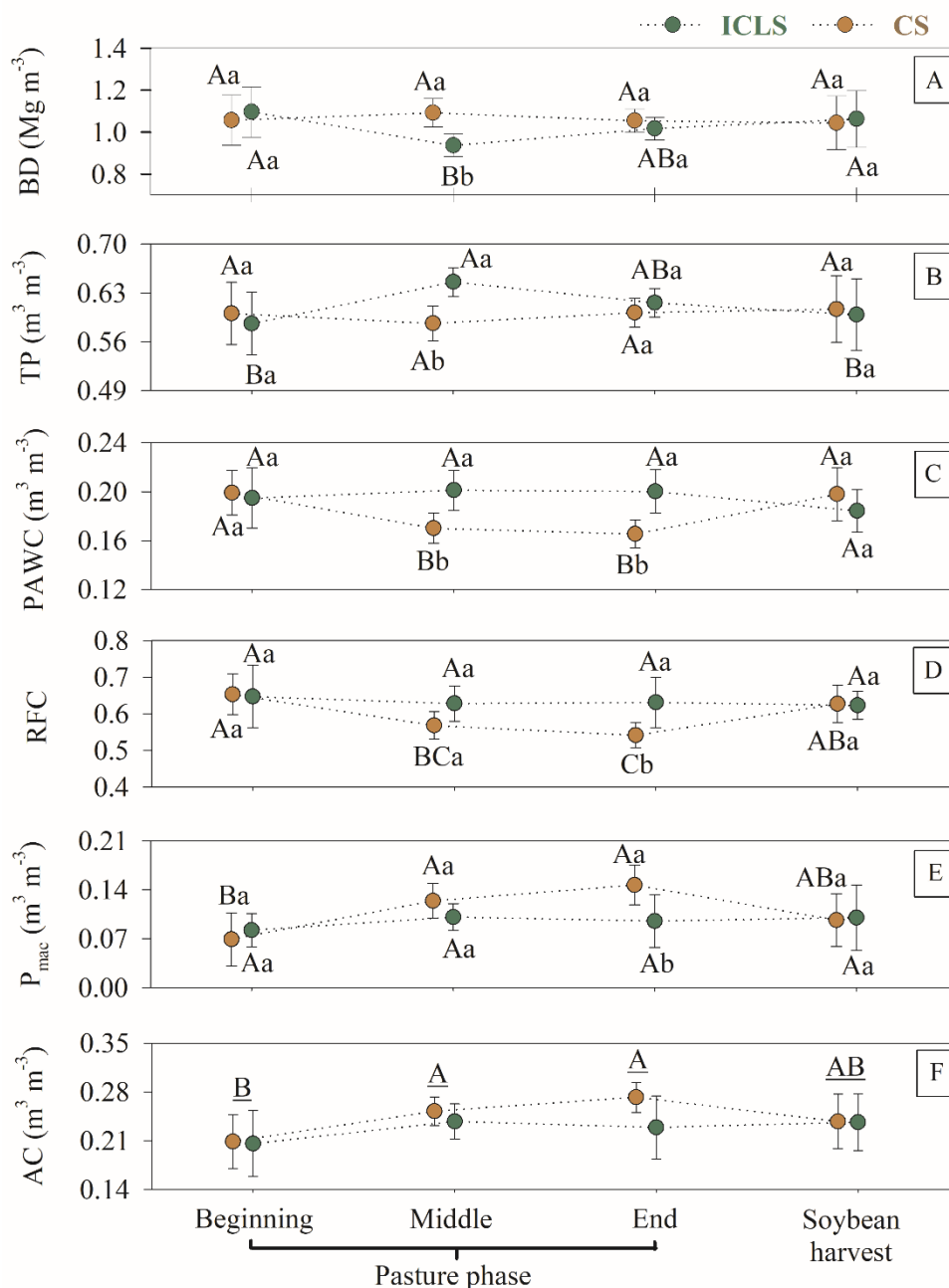
328 BD, bulk density (Mg m^{-3}); TP, total porosity ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); PAWC, plant-available water
 329 capacity ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); RFC, relative field capacity (DN, dimensionless); P_{mac} , macroporosity
 330 ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); AC, aeration capacity ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); K_s , saturated hydraulic conductivity (mm s^{-1});
 331 λ_m , pore radius characteristic (mm) and C_{λ_m} , quantity of hydraulically active pores ($10^4 \times$
 332 N° of pores m^{-2}). *Significant at $P < 0.05$; ** Significant at $P < 0.01$; *** Significant at P
 333 < 0.001 ; ns not significant.

334

335 Soil structural changes along the evaluation period significantly affected the bulk
 336 density and total porosity of the ICLS areas, but not in the pure crop system (Figure 1A-
 337 B). In ICLS, the lowest bulk density and the highest total porosity were observed in the
 338 middle of the pasture phase, in relation to the beginning and soybean harvest. However,
 339 no differences were detected between the evaluation of the middle and end of the pasture
 340 phase. In the middle of the pasture phase, the areas with ICLS presented lower bulk
 341 density (0.94 Mg m^{-3}) and higher total porosity ($0.65 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) compared to the pure crop
 342 system, with bulk density of 1.09 Mg m^{-3} and total porosity of $0.59 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

343 In the middle and end of the pasture phase, plant-available water capacity in the
 344 pure crop system corresponded to 0.17 and $0.16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectively, while in the ICLS
 345 the mean in these periods was $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. At the end of the pasture phase, relative field
 346 capacity was 0.63 in ICLS and 0.54 in the pure crop system (Figure 1C-D). An increase
 347 in soil macroporosity and aeration capacity was observed in the pure crop system during
 348 the middle and end of the pasture phase in relation to the beginning (Figure 1E-F).
 349 However, macroporosity remained the same in the ICLS throughout the evaluated period.
 350 Moreover, at the end of the pasture phase, macroporosity was higher in the pure crop
 351 system ($0.14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) compared to ICLS ($0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

352



353

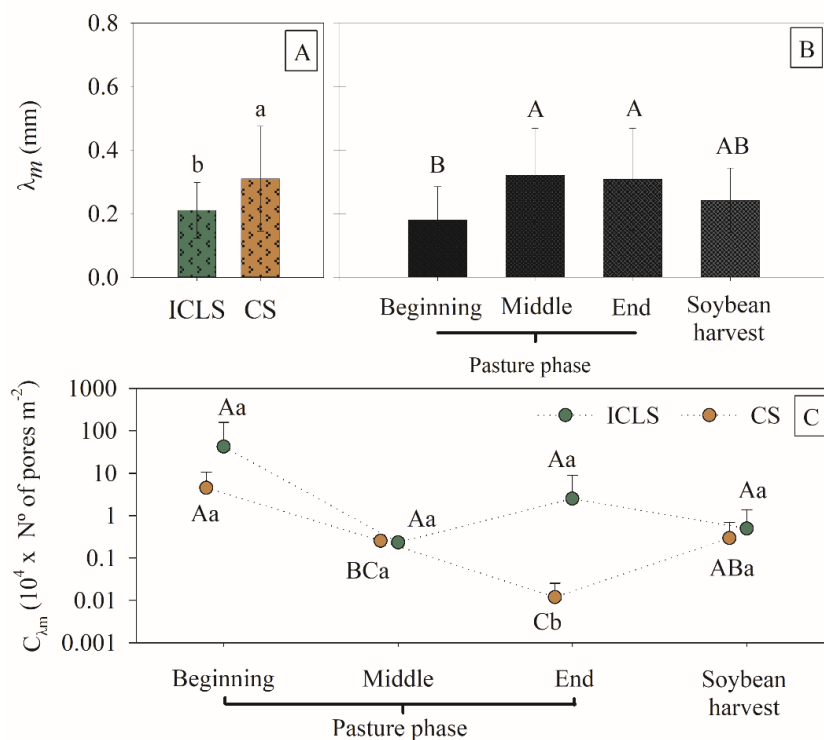
354 **Figure 1.** (A) Bulk density (BD, Mg m⁻³), (B) total porosity (TP, m³ m⁻³), (C) plant-
 355 available water capacity (PAWC, m³ m⁻³), (D) relative field capacity (RFC,
 356 dimensionless), (E) macroporosity (P_{mac}, m³ m⁻³) and (F) aeration capacity (AC, m³ m⁻³)
 357 from 0 to 10 cm soil depth under the integrated crop-livestock system (ICLS) or pure
 358 cropping system (CS). Capital letters compare periods within each cropping system,
 359 except for AC (F) where underlined capital letters compare periods independently of the

360 cropping system. Lowercase letters compare different cropping systems within each
 361 period. Means followed by the same letters do not differ by Tukey's test at $P < 0.05$.

362

363 The rate of water infiltration is related to the radius of hydraulically active pores
 364 and the amount of these pores, i.e., the connectivity of the pores along the soil profile.
 365 Therefore, these independent indicators of the SPQI aim at describing soil structural
 366 characteristics responsible for the water flow. Characteristic mean pore radius was
 367 significantly higher in the pure crop system compared to ICLS (0.31 and 0.21 mm for the
 368 pure crop system and ICLS, respectively), showing that the pure crop system contributes
 369 to the maintenance of larger pores in the soil (Figure 2). Regarding temporal changes,
 370 there were increases of 88% and 82% in characteristic mean pore radius in the middle and
 371 end of the pasture phase, respectively, compared to the beginning.

372



373

374 **Figure 2.** Characteristic mean pore radius (λ_m) and quantity of hydraulically active pores
 375 (C_{λ_m}) from 0 to 10 cm soil depth in the integrated crop-livestock system (ICLS) or pure

376 crop system (CS). Capital letters compare evaluation periods. Lowercase letters compare
377 different cropping systems. Means followed by the same letters do not differ by Tukey's
378 test at $P < 0.05$.

379

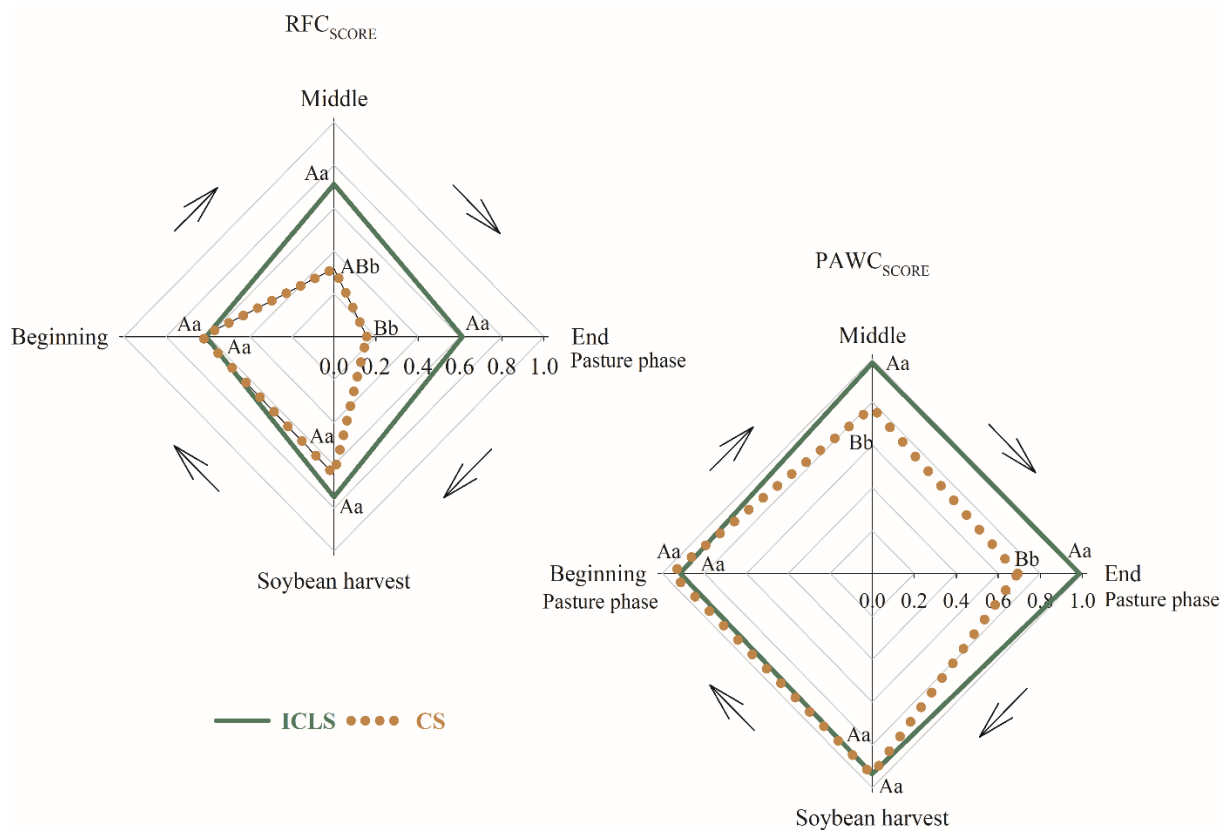
380 On the other hand, the interaction factors for the number of hydraulically active
381 soil pores indicated a decrease in the connection of the pores with the pure crop system
382 between the beginning, middle, and end of the pasture phase (Figure 2C). Despite the
383 larger pore size in pure crop system (greater effect of gravity on the infiltration process),
384 the maximum number of hydraulically active soil pores per unit area at the end of the
385 pasture phase was higher in the ICLS, showing that in ICLS soils during the transition
386 from pasture to crop phase, water flow is mainly driven by a greater number of connected
387 pores (greater effect of capillarity in the infiltration process).

388

389 **3.2 Soil physical quality index**

390 No significant effects ($P > 0.05$) of the interaction of production systems,
391 fertilization strategies, and evaluation periods were observed on the scores of the
392 indicators used in the SPQI. There were only effects of the interaction between evaluation
393 periods and cropping systems on the relative field capacity scores and plant-available
394 water capacity scores (Figure 3). The pure crop system resulted in the lowest relative field
395 capacity scores and plant-available water capacity scores during the middle (relative field
396 capacity of 0.31 and plant-available water capacity of 0.77) and end (relative field
397 capacity of 0.15 and plant-available water capacity of 0.69) of the pasture phase compared
398 to ICLS, with relative field capacity of 0.71 and 0.61 and plant-available water capacity
399 of 0.98 and 0.99 for the middle and end of the pasture phase, respectively. These results
400 show that the benefits of ICLS in the physical-hydric properties of the soil occur, mainly,

401 in the pasture phase, and reinforce the need for a detailed temporal assessment of these
 402 soil physical properties to detect the structural changes of the soil caused by the grazing.
 403



404
 405 **Figure 3.** Scores of soil physical quality indicators from 0 to 10 cm soil depth over harvest
 406 year under the integrated crop-livestock system (ICLS) or pure crop system (CS) with
 407 system fertilization (SF) or crop fertilization (CF). Relative field capacity (RFC); plant
 408 available water capacity (PAWC). Capital letters compare the evaluation periods within
 409 each production system. Lowercase letters compare different production systems within
 410 each evaluation period. Means followed by the same letters do not differ by Tukey's test
 411 at $P < 0.05$.

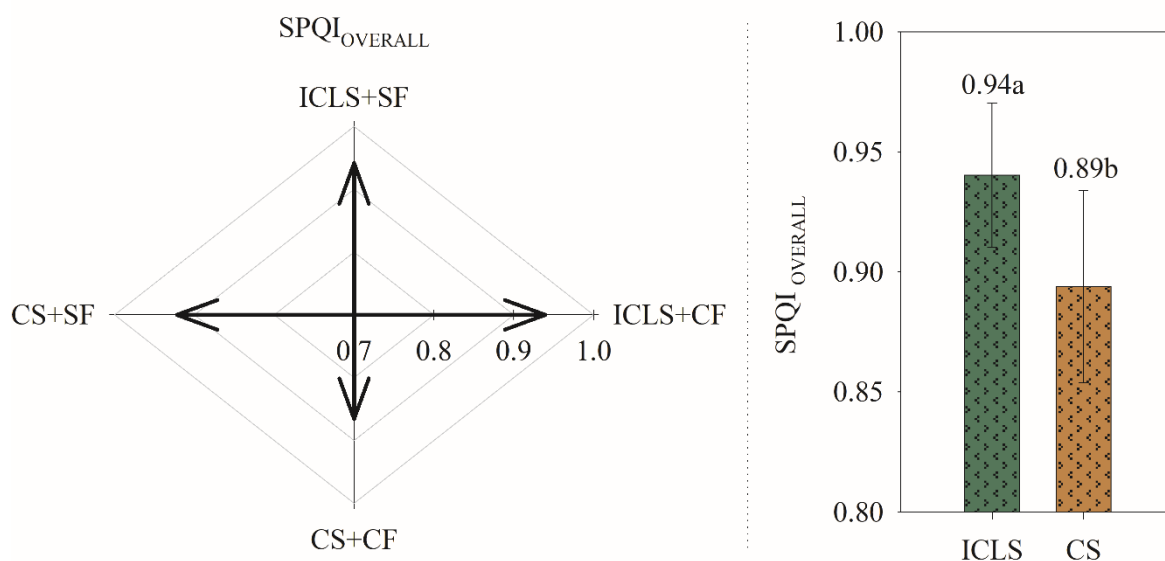
412

413 The effects of ICLS under the relative field capacity and plant available water
 414 capacity indicators equate to 40% and 46% increases in relative field capacity scores and
 415 21% and 30% increases in plant available water capacity scores during the middle and

416 end of the pasture phase, respectively. In the pure crop system, considerable reductions
417 in the relative field capacity scores and plant available water capacity scores were
418 observed between the beginning, middle, and end of the pasture phase. The relative field
419 capacity score in the pure crop system during the end of the pasture phase (0.15) was
420 lower than those observed at the beginning of this phase (0.62) and at the soybean harvest
421 (0.64). Unlike the relative field capacity, which was compromised only at the end of the
422 pasture phase, reductions in the plant available water capacity score were noted in the
423 pure crop system areas since the middle of the pasture phase.

424 In the analysis of the physical quality of the soil over time the effects of the
425 interaction of the factors were not verified ($P>0.05$). The structural variability of the soil
426 over time did not reflect in differences on soil physical quality between periods. Only
427 isolated effects of production systems, as verified in $SPQI_{OVERALL}$, with the highest
428 physical soil quality in ICLS areas (0.94 = 94%) compared to pure crop system (0.89 =
429 89%). These results show that the structural changes in the soil promoted by grazing in
430 the short term are responsible for soil physical quality in the ICLS (Figure 4).

431



432

433 **Figure 4.** Overall Soil Physical Quality Index (SPQI_{OVERALL}) scores in the integrated
 434 crop-livestock system (ICLS) or pure crop system (CS) with system fertilization (SF) or
 435 crop fertilization (CF) (0 to 10 cm depth). The different letters are the significance level
 436 at 5% of the production system effect (ICLS versus CS).

437

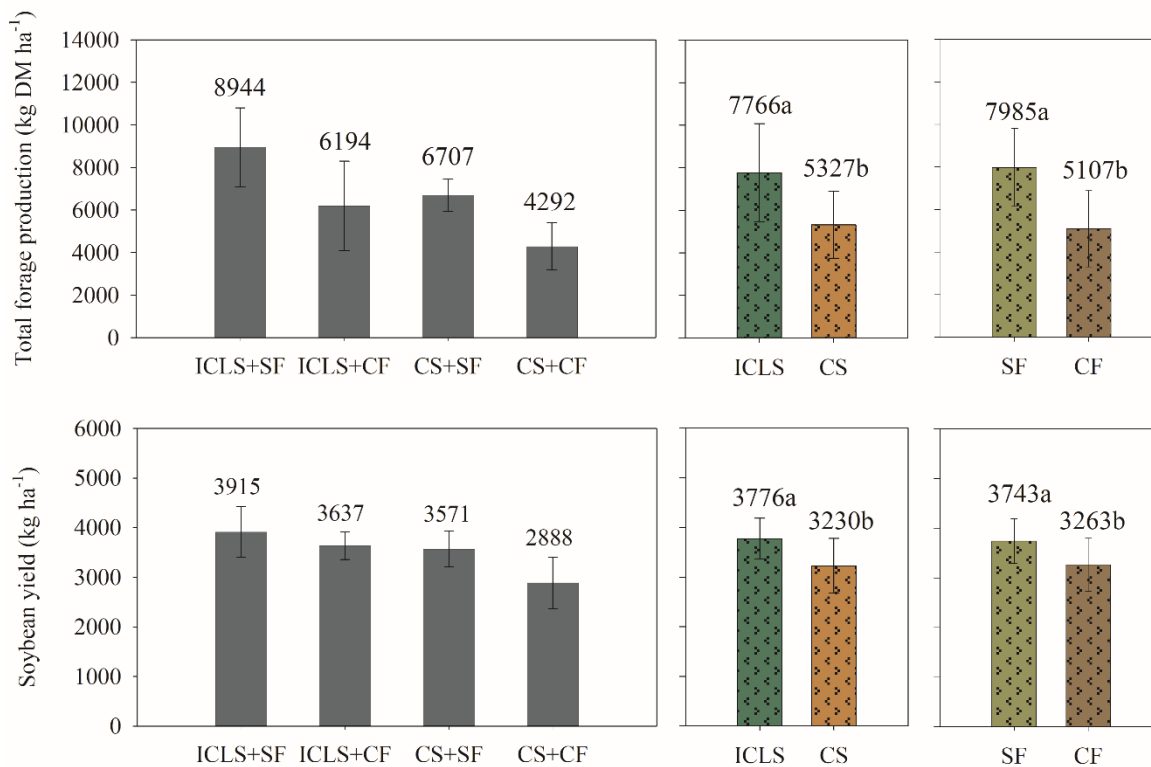
438 3.3 Crop and forage production

439 There was no significant interaction between production systems and fertilization
 440 strategies for total forage production and soybean yield. Although primary production
 441 was not affected by interactions, ICLS with system fertilization was 108% and 35%, on
 442 average, more efficient in forage and soybean production compared to the pure crop
 443 system with crop fertilization.

444 Primary production was not affected by the interaction of factors. Figure 5 shows
 445 that only isolated effects of cropping systems and fertilization strategies were significant.
 446 ICLS registered increments of 31% and 15% in total forage production (P=0.03) and
 447 soybean yield (P=0.02), respectively. Forage production (P=0.01) and soybean (P=0.04)

448 were also benefited from system fertilization with increases of 36% and 13%,
 449 respectively.

450



451

452 **Figure 5.** Total forage production and soybean yield in an integrated crop-livestock
 453 system (ICLS) or pure crop system (CS) with crop fertilization (CF) or system
 454 fertilization (SF). The different letters differed by the Tukey test at 5% of significance
 455 level.

456

457 3.4 Relationship between SPQI and primary production

458 The SPQI_{OVERALL} achieved significant correlations with the SPQI in all evaluation
 459 periods, but the strongest and significant at $P < 0.01$ correlations of 0.764 and 0.877 were
 460 observed with the indexes of the middle and end of the pasture phase. Forage ($r = 0.757$)
 461 and soybean ($r = 0.76$) yields were significantly ($P < 0.01$) correlated to SPQI_{OVERALL}.

462 Among the indexes that represent the evaluation periods, there were positive
463 correlations of total forage production with the indexes of the middle of the pasture phase
464 ($r=0.68$, $P<0.05$) and soybean harvest ($r=0.64$, $P<0.05$). The higher structural quality in
465 the middle ($r=0.75$, $P<0.01$) and end ($r=0.62$, $P<0.05$) of the pasture phase favored higher
466 soybean yields. In addition, there was also a positive relationship between forage
467 production and soybean yield ($r=0.60$, $P<0.05$).

468 Linear regressions with combined effects between cropping systems and
469 fertilization strategies indicated similar coefficients of determination (R^2) for the
470 $SPQI_{OVERALL}$ effect on the total forage production (Total forage production = -
471 $26320+36063\times SPQI_{OVERALL}$, $R^2 = 0.57$ and $P=0.001$) and soybean yield (Soybean yield
472 = $-4374+8588\times SPQI_{OVERALL}$; $R^2=0.58$ and $P<0.001$), suggesting that the influence of soil
473 physical quality is similar for the two cropping phases. Total forage production increased
474 by $361 \text{ kg DM ha}^{-1}$ for every 0.01 unit increase in $SPQI_{OVERALL}$, while this increase
475 corresponded to 86 kg ha^{-1} for soybean yield.

476

477 **4. Discussion**

478 Grain productivity in succession with pastures is still a matter of concern due to
479 the supposed negative impacts of integration with grazing animals. However, several
480 studies have already established guidelines for the coexistence between these components
481 (de Faccio Carvalho et al., 2010; de Faccio Carvalho et al., 2018; Moraes et al., 2014a).
482 When combined with conservation agricultural practices (i.e., no-till) and moderate
483 grazing intensities, instead of negative effects, ICLS can benefit from emerging properties
484 (de Faccio Carvalho et al., 2018; Moraes et al., 2014a). Thus, first, the higher soybean
485 yield in ICLS compared to non-grazed areas can be attributed to compliance with the
486 guidelines for their good functioning.

487 System fertilization in ICLS increases forage production, allowing greater
488 animal production with residual effects of nutrients for grain production in succession
489 (Assmann et al., 2018; Farias et al., 2020; Sandini et al., 2011). In the literature, there are
490 also reports of nutrient carryover from pasture to crop in ungrazed areas (Assmann et al.,
491 2003). In this study, the higher soybean yield with the system fertilization suggests that
492 the P and K provided in the pasture phase (grazed or not) are not only beneficial for forage
493 production, but also for a higher soybean performance.

494 Total forage production and soybean yield had significant correlations with
495 $SPQI_{OVERALL}$ ($P < 0.01$), indicating soil physical conditions represented by the index
496 reflect higher primary production. Furthermore, from regression analyses, it was
497 demonstrated that the influence of soil physical quality is similar despite the cropping
498 phase (pasture or soybean). The coefficients of determination for total forage production
499 and soybean yield corresponded to 0.57 and 0.58, respectively.

500 In the middle of the pasture phase, ryegrass was at maximum vegetative
501 growth, with a forage accumulation rate of $89 \text{ kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ of DM, the highest ($P < 0.01$)
502 between the evaluation times (beginning of the pasture phase of $23.3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ of DM
503 and end of the pasture phase of $22.6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ of DM) (result not shown). According
504 to Anghinoni et al. (2013) there is a balance in the growth dynamics of annual grass
505 species such as Italian ryegrass, with equivalent proportions of aboveground and
506 belowground biomass production. Thus, the temporal variability of bulk density and total
507 porosity and the differences between cropping systems in the middle of the pasture phase
508 can be explained by the stimulation of root growth by defoliation and, consequently, the
509 induction of new tillers in ICLS areas.

510 Roots contribute to reducing soil density through a phenomenon known as
511 biological perforation (Cresswell and Kirkegaard, 1995). In addition, the roots act as a

512 barrier to the impact of animal trampling (Franzluebbers and Stuedemann, 2008) and
513 through the production of organic exudates (Petersen and Böttger, 1991, Huang et al.,
514 2003) which increase aggregate stability and, therefore, soil porosity (Dhaliwal and
515 Kumar., 2022).

516 The type of animal (sheep), the type of soil (sandy-loam), the management of
517 the pasture structure by moderate grazing intensities ["Rotatinuous" concept by Carvalho
518 (2013)], and the specific synergisms of the interaction of these factors are the likely
519 reasons for differences in bulk density and total porosity between cropping systems
520 during the middle of the pasture phase. However, these differences were not detected at
521 the end when ryegrass was at the reproductive stage and plant growth ceased. These
522 results provide the first evidence that the beneficial effects of grazing on soil can occur at
523 periods different from those currently investigated (static evaluations only in the post-
524 grazing period). It is fundamental to consider the dynamics of structural soil changes
525 during the stocking period for a realistic understanding of the processes that occur through
526 the interaction of the components in ICLS.

527 Although there were significant differences ($P < 0.05$) between cropping
528 systems for bulk density, total porosity, and saturated hydraulic conductivity, none of
529 these differences compromised soil structural quality. In fact, the bulk density and total
530 porosity values in all evaluation periods were between the threshold levels ($< 1.80 \text{ Mg cm}^{-3}$
531 3 for bulk density and $> 0.5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ for total porosity) that represent no risk to plant growth
532 (Reichert et al., 2003, 2009; Cherubin et al., 2016a). The difference in saturated hydraulic
533 conductivity between cropping systems was subtle (0.03 and 0.02 mm s^{-1} for pure crop
534 and ICLS, respectively) and, in both systems, the mean was within the range of 0.005 and
535 0.05 , considered optimal (Reynolds et al. 2007, 2009).

536 The plant-available water capacity and relative field capacity indicators are
537 quantitatively associated with smaller diameter pores in the soil (Castellini et al. 2016).
538 In this sense, the lowest plant-available water capacity and relative field capacity and the
539 highest macroporosity in the pure crop system during the end of the pasture phase suggest
540 changes in the pore size distribution of the soil with a relative increase of larger pores and
541 a corresponding decrease of smaller pores. However, despite contributing to a larger pore
542 size in the soil, the pure crop system has lower connectivity of these pores compared to
543 ICLS in the transition between the pasture and soybean phases. The return of excreta in
544 the ICLS favors greater biological activity in the soil, such as earthworms and beetles
545 (Brown et al., 2010, Pagenkemper et al., 2015), which in addition to the root stimulus,
546 create continuous channels for the preferential movement of the water (Ghestem et al.,
547 2011). Dhaliwal and Kumar (2022) revealed greater pore tortuosity in pure cropping
548 systems, indicating the presence of a large number of disconnected pores. While the lower
549 tortuosity for ICLS suggested the presence of a well-interconnected network of
550 continuous flow channels.

551 In this study, the highest flow-weighted mean pore size resulted in higher
552 saturated hydraulic conductivity in the pure crop system, regardless of the evaluation
553 period. Ambus et al. (2018) found similar results, where saturated hydraulic conductivity
554 in the topsoil layer in grazed areas was lower than in ungrazed ones. Also, according to
555 Ambus et al. (2018), these results are related to the filling of the soil pore space by the
556 ryegrass roots since the stimulus to root growth is greater in the ICLS.

557 The two cropping systems had significant increases in aeration capacity during
558 the evaluations of the middle and end of the pasture phase. Despite the higher
559 macroporosity in the pure crop system at the end of the pasture phase compared to ICLS,
560 the aeration of these soils was not compromised. There were no differences between

561 cropping systems in the aeration capacity in any evaluation period. These results suggest
562 that changes started in the middle of the pasture phase in the pore size of the soil remain
563 until the beginning of the succeeding crop. On the other hand, bulk density and total
564 porosity are more sensitive to trampling impacts until the end of the pasture phase.

565 The severe reductions in the relative field capacity and plant-available water
566 capacity scores in the middle and end of the pasture phase in pure crop ($P < 0.05$) decreased
567 $SPQI_{OVERALL}$ compared to ICLS. Proper grazing management maintains an adequate
568 relationship between the macro and micropores of the soil, favoring good aeration,
569 infiltration, and water retention in the soil (Liebig et al., 2011). Furthermore, organic
570 matter in no-till systems is strongly related to the water content available to plants in the
571 soil (Shahab et al., 2013). Thus, it is believed that the greater contribution of organic
572 matter in ICLS (Rakkar and Blanco-Canqui., 2018; Franzluebbbers et al., 2011), in
573 addition to moderate grazing intensities and agricultural conservation practices, favors
574 the maintenance of a soil quality suitable for plant development.

575 The strongest and most significant correlations ($P < 0.01$) between $SPQI_{OVERALL}$
576 with the indexes of the middle and end of the pasture phase showed that, regardless of the
577 cropping system or fertilization strategy, the main changes influencing the physical
578 quality of the soils occur during the middle and end of the pasture phase. In this sense, it
579 is worth reinforcing the importance of appropriate management practices throughout the
580 stocking period, since these results are directly related to the adopted pasture management
581 strategy and, consequently, correct control of the stocking rate throughout the pasture
582 phase of ICLS.

583 In general, after soybean cultivation, the soil structure returned to the conditions
584 observed at the beginning of the pasture phase. The rearrangement of soil particles post-
585 soybean was already registered in the literature (Ambus et al., 2018; Bonetti et al., 2019).

586 These studies showed that changes in soil structure during grazing were of low
587 persistence. In tropical regions, structural changes in the soil take longer (Gifford and
588 Hawkins, 1978; Greenwood and McKenzie, 2001). However, in temperate and
589 subtropical climate regions, as in the present research, the responses are faster, due to the
590 action of frequent cycles of wetting and drying, freezing and thawing cycles, and vigorous
591 growth of pasture roots (Taboada et al., 2011).

592 The absence of significant interaction between the production systems and
593 fertilization strategies for all variables contradicted the expectation that system
594 fertilization in grazed areas promotes greater soil physical-hydric quality. However, it is
595 worth noting that some changes induced by ICLS are only visible in the long term (de
596 Albuquerque Nunes et al., 2021), emphasizing the relevance of conducting long-term
597 experiments to record the complex temporal interactions of these systems. Thus,
598 considering the complexity of interactions in ICLS and aiming to clarify which
599 mechanisms promote the greatest efficiency of system fertilization, future research should
600 include all the interrelationships between the biological, physical-hydric, and chemical
601 components of the soil.

602 In this research, all treatments were fertilized with N at the pasture establishment,
603 considering knowledge from previous studies (Assmann et al., 2015) that stated that N
604 fixation by soybean is not enough to maintain the subsequent pasture phase. However, it
605 is worth mentioning that conventional fertilization practices in southern Brazil in ICLS,
606 still totally neglect the need for fertilization in the pasture phase, including N fertilization.

607 Nitrogen, due to its close connection with the carbon cycle, has the power to cause
608 the greatest changes in nutrient cycling (Assmann et al., 2017). Thus, in the short term,
609 the absence of N fertilization causes severe impacts on plant growth. Under these
610 conditions, and with inadequate handling of the animal stocking, the compressive forces

611 caused by the trampling of animals on the soil surface prevail, which results in negative
612 impacts on the soil structural quality (Taboada et al., 2011). In this way, the effects of
613 system fertilization with P and K on the soil structural quality were probably minimized
614 by the effects of N fertilization in the pasture establishment in all treatments. Thus, future
615 studies should be carried out including also treatments without N in the pasture phase, to
616 quantify the impacts of the absence of N fertilization on the soil's physical properties and
617 their respective consequences on the system production.

618 The results of this research documented the relationship between the temporal
619 dynamics of soil physical processes and the complex responses of interactions in the
620 integrated crop-livestock systems. As highlighted by Moraes et al. (2014b), it is
621 fundamental to develop studies that establish as much as possible the cause-effect
622 relationships in ICLS, in order to facilitate the understanding of the processes capable of
623 optimizing the use of inputs. Based on this understanding, it becomes possible to guide
624 ICLS recommendations on fertilizer management in line with the new requirements:
625 increasing food production with greater efficiency in the use of nutrients and water (FAO,
626 2019).

627 At the beginning of the soybean crop, ICLS increased the available water capacity
628 for the plants in the soil by 30%, compared to the pure crop system. These findings
629 reinforce the potential of ICLS to increase global food production while promoting
630 greater efficiency in the use of water resources. Furthermore, as shown in the results, the
631 fertilization system, in addition to allowing the recycling of nutrients, can reduce the need
632 for non-renewable inputs and prevent environmental contamination due to the
633 indiscriminate use of fertilizers.

634

635

636 **5. Conclusions**

637 Current findings reveal that the effects of grazing on soil structure are potentiated
638 in the period of greater forage accumulation. Thus, future investigations in ICLS should
639 avoid summarizing the effects of the complexity of these systems in static evaluations
640 only in the post-grazing period, paying attention to possible effects of grazing during the
641 stocking period is fundamental for a realistic understanding of the processes that occur
642 by the interaction of the components of the ICLS.

643 It has also been demonstrated that the system fertilization strategy and the crop-
644 livestock integration under no-tillage reflect higher primary production (forage and
645 soybean). This study provides the first evidence that the higher soil structural quality in
646 ICLS favors the highest yields of plant species at all stages of production. However, the
647 efficiency of water and nutrient use with system fertilization is only partially explained
648 by the soil's physical-hydric quality. Therefore, doubts remain about which mechanisms
649 are driving these results. Finally, only through research including all the interrelationships
650 between the biological, physical-hydric, and chemical components of the soil, it is
651 possible to answer the questions: "What are the processes and agents involved in the
652 efficiency of the use of water and nutrients in ICLS, and what is the implication of these
653 in the time of nutrient replacement in the system?".

654

655 **Acknowledgments**

656 The authors are grateful to the farm staff at Agronomy Experimental Station of the Federal
657 University of Rio Grande do Sul, the members of the Grazing Ecology Research Group
658 (GPEP), Aliança SIPA, and the Interdisciplinary Research Group on Environmental
659 Biogeochemistry (IRGEB).

660

661 **Funding**

662 The study was funded by Fundação Agrisus - Project PA3010/20 and Coordenação de
663 Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior– Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

664

665 **References**

666 Ambus, J.V., Reichert, J.M., Gubiani, P.I., de Faccio Carvalho, P.C., 2018. Changes in
667 composition and functional soil properties in long-term no-till integrated crop-
668 livestock system. *Geoderma*, 330, 232-243. doi:10.1016/j.geoderma.2018.06.005

669 Assmann, T.S., Ronzelli Júnior, P., Moraes, A.D., Assmann, A.L., Koehler, H.S., Sandini,
670 I., 2003. Rendimento de milho em área de integração lavoura-pecuária sob o sistema
671 plantio direto, em presença e ausência de trevo branco, pastejo e nitrogênio. *Revista*
672 *Brasileira de Ciência do Solo*, 27, 675-683. doi:10.1590/S0100-
673 06832003000400012

674 Assmann, J.M., Anghinoni, I., Martins, A.P., Costa, S.E.V.G. de A., Kunrath, T.R., Bayer,
675 C., Franzluebbbers, A.J., 2015. Carbon and nitrogen cycling in an integrated soybean-
676 beef cattle production system under different grazing intensities. *Pesquisa*
677 *Agropecuária Brasileira*, 50, 967-978. doi:10.1590/S0100-204X2015001000013

678 Assmann, T.S., Soares, A.B., Assmann, A.L. et al., 2017. Adubação de Sistemas em
679 Integração Lavoura-Pecuária. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Integrados de
680 Produção Agropecuária e Encontro de Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil,
681 4, p. 67–84, ISBN - 978-85-99584-10-1. Disponível em:
682 <http://www.pb.utfpr.edu.br/coagr/eventos>

683 Assmann, T., Martinichen, D., Lima, R.C., Huf, F.L., Zortéa, T., Assmann, A.L., Moraes,
684 A., Alvez, S.J., 2018. Adubação de sistemas e ciclagem de nutrientes em sistemas
685 integrados de produção agropecuária. In: Souza ED, Silva FD, Assmann TS,

- 686 Carneiro MAC, de Faccio Carvalho PC, Paulino HB, editors. Sistemas integrados de
687 produção agropecuária no Brasil. Tubarão: Copiart; p. 123-44.
- 688 Anghinoni, I., de Faccio Carvalho, P.C., Costa, S.E.V.G. de A., 2013. Abordagem
689 sistêmica do solo em Sistemas Integrados de Produção Agrícola e Pecuária no
690 subtropical brasileiro. In: Araújo AP, Alves BJR, editors. Tópicos em ciência do solo.
691 Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v. 8. p. 325-38.
- 692 Bardgett, R.D., Wardle, D.A., 2003. Herbivore-mediated linkages between aboveground
693 and belowground communities. *Ecology*, 84(9), 2258-2268. doi: 10.1890/02-0274
- 694 Bonetti, J.A., Anghinoni, I., Gubiani, P.I., Cecagno, D., de Moraes, M.T., 2019. Impact of
695 a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an
696 Oxisol. *Soil and Tillage Research*, 186, 280-291. doi:10.1016/j.still.2018.11.003
- 697 Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964. Hydraulic Properties of Porous Media and Their
698 Relation to Drainage Design. *Transactions of the ASAE*, 7(1), 0026–0028.
699 doi:10.13031/2013.40684
- 700 Buller, L.S., Bergier, I., Ortega, E., Moraes, A., Bayma-Silva, G., Zanetti, M.R., 2015.
701 Soil improvement and mitigation of greenhouse gas emissions for integrated crop–
702 livestock systems: Case study assessment in the Pantanal savanna highland, Brazil.
703 *Agricultural Systems*, 137, 206-219. doi:10.1016/j.agsy.2014.11.004
- 704 Burdine, N.T., 1953. Relative Permeability Calculations From Pore Size Distribution
705 Data. *Journal of Petroleum Technology*, 5(03), 71–78. doi:10.2118/225-g
- 706 Brown, J., Scholtz, C.H., Janeau, J.L., Grellier, S., Podwojewski, P., 2010. Dung beetles
707 (Coleoptera: Scarabaeidae) can improve soil hydrological properties. *Applied soil
708 ecology*, 46(1), 9-16. doi:10.1016/j.apsoil.2010.05.010
- 709 de Albuquerque Nunes, P. A., Laca, E. A., de Faccio Carvalho, P. C., Li, M., de Souza
710 Filho, W., Robinson Kunrath, T., Martins, A.P., Gaudin, A., 2021. Livestock

- 711 integration into soybean systems improves long-term system stability and profits
712 without compromising crop yields. *Scientific reports*, 11(1), 1-14.
713 doi.org/10.1038/s41598-021-81270-z
- 714 de Faccio Carvalho, P.C., Anghinoni, I., de Moraes, A., de Souza, E.D., Sulc, R.M., Lang,
715 C.R., Bayer, C., 2010. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and
716 soil improvement in no-till integrated systems. *Nutrient Cycling in*
717 *Agroecosystems*, 88(2), 259-273. doi: 10.1007/s10705-010-9360-x
- 718 de Faccio Carvalho, P.C., Moraes, A.D., Pontes, L.D.S., Anghinoni, I., Sulc, R.M.,
719 Batello, C., 2014. Definições e terminologias para sistema integrado de produção
720 agropecuária. *Revista Ciência Agronômica*, 45, 1040-1046. doi:10.1590/S1806-
721 66902014000500020
- 722 de Faccio Carvalho, P.C., 2013. Harry Stobbs Memorial Lecture: can grazing behavior
723 support innovations in grassland management? *Trop Grasslands Forrajes Trop.*
724 1:137. doi: 10.17138/TGFT(1)137-155
- 725 de Faccio Carvalho, P.C., Peterson, C.A., Nunes, P.A.D.A., Martins, A.P., de Souza Filho,
726 W., Bertolazi, V.T., Anghinoni, I., 2018. Animal production and soil characteristics
727 from integrated crop-livestock systems: toward sustainable intensification. *Journal*
728 *of animal science*, 96(8), 3513-3525. doi: 10.1093/jas/sky085
- 729 Castellini, M., Iovino, M., Pirastru, M., Niedda, M., Bagarello, V., 2016. Use of BEST
730 procedure to assess soil physical quality in the Baratz Lake catchment (Sardinia,
731 Italy). *Soil Science Society of America Journal*, 80(3), 742-755. doi:
732 10.2136/sssaj2015.11.0389
- 733 Cresswell, H.P., Kirkegaard, J.A., 1995. Subsoil amelioration by plant-roots-the process
734 and the evidence. *Soil Research*, 33(2), 221-239. doi:10.1071/SR9950221
- 735 Chávez, L.F., Escobar, L.F., Anghinoni, I., de Faccio Carvalho, P.C., Meurer, E.J., 2011.

- 736 Diversidade metabólica e atividade microbiana no solo em sistema de integração
737 lavoura-pecuária sob intensidades de pastejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46,
738 1254-1261. doi:10.1590/S0100-204X2011001000020
- 739 Cherubin, M.R., Karlen, D.L., Cerri, C.E., Franco, A.L., Tormena, C.A., Davies, C.A.,
740 Cerri, C.C., 2016a. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane
741 expansion in Brazil. *PLoS One* 11 (3), e0150860. doi:10.1371/journal.pone.0150860
- 742 Cherubin, M.R., Karlen, D.L., Franco, A.L., Tormena, C.A., Cerri, C.E., Davies, C.A.,
743 Cerri, C.C., 2016b. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil.
744 *Geoderma* 267, 156–168. doi:10.1016/j.geoderma.2016.01.004
- 745 Commission of Chemistry and Soil Fertility (CQFS-RS/SC), 2016. Manual de calagem e
746 adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Rio Grande do
747 Sul, Brazil: SBCS-NRS/EMBRAPA-CNPT.
- 748 Dhaliwal, J.K., Kumar, S., 2022. 3D-visualization and quantification of soil porous
749 structure using X-ray micro-tomography scanning under native pasture and crop-
750 livestock systems. *Soil and Tillage Research*, 218, 105305.
751 doi:10.1016/j.still.2021.105305
- 752 FAO, 2014. Building a common vision for sustainable food and agriculture. Rome: Food
753 and Agriculture Organization of the United Nations. [http://www.fao.org/3/a-](http://www.fao.org/3/a-i3940e.pdf)
754 [i3940e.pdf](http://www.fao.org/3/a-i3940e.pdf)
- 755 FAO, 2019. Production and Resources. Climate-smart livestock production. Food and
756 Agriculture Organization of the United Nations, Rome
- 757 Farias, G.D., Dubeux, J.C.B., Savian, J.V., Duarte, L.P., Martins, A.P., Tiecher, T.,
758 Bremm, C., 2020. Integrated crop-livestock system with system fertilization
759 approach improves food production and resource-use efficiency in agricultural
760 lands. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(6), 1-9. doi:10.1007/s13593-

- 761 020-00643-2
- 762 Franzluebbbers, A.J., Stuedemann, J.A., 2008. Soil physical responses to cattle grazing
763 cover crops under conventional and no tillage in the Southern Piedmont USA. *Soil
764 and Tillage Research*, 100(1-2), 141-153. doi:10.1016/j.still.2008.05.011
- 765 Franzluebbbers, A.J., Stuedemann, J.A., Franklin, D.H., 2011. Water infiltration and
766 surface-soil structural properties as influenced by animal traffic in the Southern
767 Piedmont USA. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27: 256–265.
768 doi:10.1017/S1742170511000378
- 769 Franzluebbbers, A.J., Sawchik, J., Taboada, M.A., 2014. Agronomic and environmental
770 impacts of pasture–crop rotations in temperate North and South America.
771 *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 18-26.
772 doi:10.1016/j.agee.2013.09.017
- 773 Ghestem, M., Sidle, R.C., Stokes, A., 2011. The influence of plant root systems on
774 subsurface flow: implications for slope stability. *Bioscience*, 61(11), 869-879. doi:
775 10.1525/bio.2011.61.11.6
- 776 Gifford, G.F., Hawkins, R.H., 1978. Hydrologic impact of grazing on infiltration. *Water
777 Resour. Res.* 14:305–313. doi:10.1029/WR014i002p00305
- 778 Greenwood, K.L., McKenzie, B.M., 2001. Grazing effects on soil physical properties and
779 the consequences for pastures: a review. *Australian Journal of Experimental
780 Agriculture*, 41(8), 1231-1250. doi:10.1071/EA00102
- 781 Watson, K.W., Luxmoore, R.J., 1986. Estimating Macroporosity in a Forest Watershed
782 by use of a Tension Infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 50(3),
783 578–582. doi: 10.2136/sssaj1986.03615995005000030007x
- 784 Haverkamp, R., Ross, P.J., Smettem, K.R.J., Parlange, J.Y., 1994. Three-dimensional
785 analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 2. Physically based infiltration

- 786 equation. *Water Resources Research*, 30(11), 2931-2935. doi:10.1029/94WR01788
- 787 Haverkamp, R., Debionne, S., Viallet, P., Angulo-Jaramillo, R., de Condappa, D., 2006.
- 788 Soil properties and moisture movement in the unsaturated zone. J.W. Delleur (Ed.),
- 789 The handbook of Groundwater Engineering, CRC, pp. 6.1-6.59
- 790 House, G.J., Brust, G.E., 1989. Ecology of low-input, no-tillage agroecosystems.
- 791 *Agriculture, ecosystems & environment*, 27(1-4), 331-345. doi:10.1016/0167-
- 792 8809(89)90096-0
- 793 Huang, Z., Haig, T., Wu, H., An, M., Pratley, J., 2003. Correlation between phytotoxicity
- 794 on annual ryegrass (*Lolium rigidum*) and production dynamics of allelochemicals
- 795 within root exudates of an allelopathic wheat. *Journal of chemical ecology*, 29(10),
- 796 2263-2279. doi: 10.1023/A:1026222414059
- 797 Iovino, M., Castellini, M., Bagarello, V., Giordano, G., 2016. Using Static and Dynamic
- 798 Indicators to Evaluate Soil Physical Quality in a Sicilian Area. *Land Degradation*
- 799 *and Development*, 27(2), 200–210. doi:10.1002/ldr.2263.
- 800 Lassabatère, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J.M., Cuenca, R., Braud, I.,
- 801 Haverkamp, R., 2006. Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through
- 802 Infiltration Experiments-BEST. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2),
- 803 521–532. doi:10.2136/sssaj2005.0026
- 804 Liebig, M.A., Tanaka, D.L., Kronberg, S.L., Scholljegerdes, E.J., Karn, J.F., 2011. Soil
- 805 hydrological attributes of an integrated crop-livestock agroecosystem: increased
- 806 adaptation through resistance to soil change. *Applied and Environmental Soil*
- 807 *Science*, 2011. doi: 10.1155/2011/464827
- 808 Martins, A.P., de Andrade Costa, S.E.V., Anghinoni, I., Kunrath, T.R., Balerini, F.,
- 809 Cecagno, D., de Faccio Carvalho, P.C., 2014. Soil acidification and basic cation use
- 810 efficiency in an integrated no-till crop–livestock system under different grazing

- 811 intensities. *Agriculture, ecosystems & environment*, 195, 18-28.
812 doi:10.1016/j.agee.2014.05.012
- 813 Martins, A.P., Anghinoni, I., Kunrath, T.R., de Faccio Carvalho, P.C., 2015. Integração
814 Soja-Bovinos de Corte no Sul Do Brasil. *Boletim Técnico*. Porto Alegre, Brazil:
815 UFRGS.
- 816 Moraes, A., de Faccio Carvalho, P.C., Anghinoni, I., Lustosa, S.B.C., de Andrade,
817 S.E.V.G., Kunrath, T.R., 2014a. Integrated crop–livestock systems in the Brazilian
818 subtropics. *European Journal of Agronomy*, 57, 4-9. doi:10.1016/j.eja.2013.10.004
- 819 Moraes, A.D., de Faccio Carvalho, P.C., Lustosa, S.B.C., Lang, C.R., Deiss, L., 2014b.
820 Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. *Revista Ciência*
821 *Agrônômica*, 45, 1024-1031. doi:10.1590/S1806-66902014000500018
- 822 Moreira, W.H., Tormena, C.A., Betioli Junior, E., Petean, L.P., Alves, S.J., 2014.
823 Influência da altura de pastejo de azevém e aveia em atributos físicos de um
824 Latossolo Vermelho distroférico, após sete anos sob integração lavoura-pecuária.
825 *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38, 1315-1326. doi:10.1590/S0100-
826 06832014000400027
- 827 Mottet, A., de Haan, C., Falcucci, A., Tempio, G., Opio, C., Gerber, P., 2017. Livestock:
828 On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Glob*
829 *Food Sec* 14:1–8. doi:10.1016/j.gfs.2017.01.001
- 830 Mott, G.O., Lucas, H.L., 1952. The design, conduct, and interpretation of grazing trials
831 on cultivated and improved pastures. In: Wagner R.E. et al., (eds) *Proceedings 6th*
832 *International Grassland Congress*, Pennsylvania State College, PA, 17–23 August
833 1952, pp. 1380–1385. Hershey, PA, USA: Pennsylvania State College.
- 834 Mubarak, I., Mailhol, J.C., Angulo-Jaramillo, R., Ruelle, P., Boivin, P., Khaledian, M.,
835 2009. Temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation.

- 836 Geoderma, 150(1-2), 158-165. doi:10.1016/j.geoderma.2009.01.022
- 837 Pagenkemper, S.K., Athmann, M., Uteau, D., Kautz, T., Peth, S., Horn, R., 2015. The
838 effect of earthworm activity on soil bioporosity—Investigated with X-ray computed
839 tomography and endoscopy. Soil and Tillage Research, 146, 79-88.
840 doi:10.1016/j.still.2014.05.007
- 841 Petersen, W., Böttger, M., 1991. Contribution of organic acids to the acidification of the
842 rhizosphere of maize seedlings. Plant and Soil, 132(2), 159-163.
843 doi:10.1007/BF00010396
- 844 R Core Team, 2013. R: a Language and Environment for Statistical Computing. Vienna:
845 R Foundation for Statistical Computing. Available from: <http://www.R-project.org/>.
- 846 Rakkar, M.K., Blanco-Canqui, H., 2018. Grazing of crop residues: Impacts on soils and
847 crop production. Agriculture, Ecosystems & Environment, 258, 71-90. doi:
848 10.1016/j.agee.2017.11.018
- 849 Reichert, J.M., Reinert, D.J., Braida, J.A., 2003. Qualidade dos solos e sustentabilidade
850 de sistemas agrícolas. Ciência & Ambiente, 27, 29-48.
- 851 Reichert, J.M., Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.J., Horn, R., Håkansson, I., 2009. Reference
852 bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in
853 subtropical highly weathered soils. Soil and Tillage Research, 102(2), 242-254.
854 doi:10.1016/j.still.2008.07.002
- 855 Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., Fox, C.A., Tan, C.S., Zhang, T.Q., 2007. Land
856 management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. Soil and
857 Tillage Research, 96(1–2), 316–330. doi:10.1016/j.still.2007.07.003
- 858 Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., Yang, X.M., 2009. Use of indicators
859 and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality.
860 Geoderma, 152(3–4), 252–263. doi:10.1016/j.geoderma.2009.06.009

- 861 Sandini, I.E., Moraes, A.D., Pelissari, A., Neumann, M., Falbo, M.K., Novakowski, J.H.,
862 2011. Efeito residual do nitrogênio na cultura do milho no sistema de produção
863 integração lavoura-pecuária. *Ciência Rural*, 41, 1315-1322. doi:10.1590/S0103-
864 84782011005000099
- 865 Shahab, H., Emami, H., Haghnia, G.H., Karimi, A., 2013. Pore size distribution as a soil
866 physical quality index for agricultural and pasture soils in northeastern Iran.
867 *Pedosphere*, 23(3), 312-320. doi:10.1016/S1002-0160(13)60021-1
- 868 Souza, E.S., Antonino, A.C.D., Heck, R.J., Montenegro, S.M.G.L., Lima, J.R.S.,
869 Sampaio, E.V.S.B., Angulo-Jaramillo, R., Vauclin, M., 2014. Effect of crusting on
870 the physical and hydraulic properties of a soil cropped with Castor beans (*Ricinus*
871 *communis* L.) in the northeastern region of Brazil. *Soil and Tillage Research*, 141,
872 55–61. doi:10.1016/j.still.2014.04.004
- 873 Taboada, M.A., Rubio, G., Chaneton, E.J., Hatfield, J.L., Sauer, T.J., 2011. Grazing
874 impacts on soil physical, chemical, and ecological properties in forage production
875 systems. *Soil management: building a stable base for agriculture*, 20, 301-320.
876 doi:10.2136/2011.soilmanagement.c20
- 877 Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A.L, Teixeira, W.G., 2017. Manual de
878 métodos de análise de solo EMBRAPA (Ed.), Embrapa Solos. Brasília, DF. p. 573.
- 879 Topp, G.C., Reynolds, W.D., Cook, F.J., Kirby, J.M., Carter, M.R., 1997. Physical
880 attributes of soil quality. In E. G. GREGORICH & M. . CARTER (Eds.), *Soil Quality*
881 *for Crop Production and Ecosystem Health*. v.25. pp. 21–58. *Development in Soil*
882 *Science*. doi:10.1016/S0166-2481(97)80029-3
- 883 van Genuchten, M., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic
884 conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5),
885 892–898. doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

886 Van Haveren, B.P., 1983. Soil bulk density as influenced by grazing intensity and soil
887 type on a shortgrass prairie site. *J. Range Manage.* 36:586–588.
888 doi:10.2307/3898346

CAPITULO III⁴

Artigo preparado de acordo com as normas da revista Science of the Total Environment (Apêndice II)

1 **SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA SOB ADUBAÇÃO**
2 **DE SISTEMA MELHORA ÍNDICES DE QUALIDADE DO SOLO E AUMENTA**
3 **A PRODUÇÃO PRIMÁRIA**

4

5 **RESUMO**

6 As inter-relações entre os componentes bioquímicos e físico-hídricos do solo em sistemas
7 integrados de produção agropecuária (SIPA) sob adubação de sistema podem levar a
8 maior eficiência do uso de nutrientes. No entanto, poucas pesquisas exploram uma
9 organização transdisciplinar, tornando os progressos científicos limitados e desconexos.
10 Este estudo buscou avaliar as relações entre a qualidade bioquímica e físico-hídrica do
11 solo com a eficiência de diferentes estratégias de adubação em SIPA e um sistema
12 exclusivo para produção de grãos. Foram avaliadas duas estratégias de adubação
13 (adubação de sistema e adubação na lavoura) em esquema fatorial com dois sistemas de
14 produção diferenciados pela presença (SIPA) e ausência do pastejo sob delineamento em
15 blocos casualizados com três repetições. Na ausência do pastejo, a soja foi cultivada
16 seguida pelo azevém como cobertura do solo. No SIPA, o azevém era pastejado por
17 ovinos. Na adubação na lavoura, foram aplicados fósforo e potássio no plantio da soja e
18 nitrogênio no estabelecimento do azevém. Na adubação do sistema foram aplicados
19 nitrogênio, fósforo e potássio durante o estabelecimento do azevém. Foram calculados
20 índices de qualidade do solo (IQS) através de indicadores físico-hídricos e bioquímicos.
21 A produção primária (forragem e soja) também foi determinada. O SIPA com adubação
22 de sistema promoveu o maior IQS (0,77), comparado as áreas sem pastejo com adubação
23 de sistema (0,63) e ao SIPA com adubação na lavoura (0,64). Em reflexo aos resultados
24 obtidos com o IQS, o SIPA com adubação de sistema, obteve as maiores produções
25 primárias comparado as áreas sem pastejo com adubação de sistema e ao SIPA com
26 adubação na lavoura. As descobertas deste estudo evidenciaram que a eficiência da
27 adubação de sistema em SIPA está fortemente relacionada com os atributos físico-hídricos
28 e bioquímicos do solo.

29

30 **PALAVRAS-CHAVE:** integração agropecuária; bioquímica do solo; física do solo;
31 pastejo; manejo da adubação.

32

33 **1. Introdução**

34 A integração do cultivo de plantas agrícolas e a produção animal é uma técnica
35 de exploração usada há milhares de anos. No entanto, com pressões políticas e
36 econômicas cada vez maiores, os sistemas produtores de alimentos optaram por
37 intensificar as suas operações através da separação entre as atividades agrícolas e
38 pecuárias (Garrett et al., 2020). Embora que, historicamente, a especialização desses
39 sistemas tenha representando acréscimos nos rendimentos produtivos, o que inicialmente
40 demonstrou-se como algo vantajoso economicamente. Essa simplificação devido à forte
41 dependência de insumos externos (ex. pesticidas e fertilizantes) expôs diversas
42 consequências ambientais negativas (MacDonald e McBride, 2009; Gerber et al., 2013).
43 Dentre as consequências, pode-se citar a perda de biodiversidade nos ecossistemas,
44 poluição do ar e da água, diminuição das reservas de água subterrânea, emissão de gases
45 de efeito estufa e degradação dos solos (Duru et al., 2015; Peyraud et al., 2014).

46 No cenário atual, diante da insustentabilidade associada à alta especialização na
47 produção de alimentos, as iniciativas conservacionistas como os sistemas integrados de
48 produção agropecuária (SIPA) estão ressurgindo gradualmente (Fraser et al., 2014;
49 Moraes et al., 2014b). A integração da pecuária com a produção agrícola fornece diversos
50 serviços ecossistêmicos como, por exemplo, elevada produção de grãos, alta eficiência
51 no uso de nutrientes (Farias et al., 2020) e, conseqüentemente, redução dos riscos de
52 contaminação dos recursos hídricos, manutenção da fertilidade do solo e também
53 auxiliam na estabilidade da produção agrícola à variabilidade ambiental (de Albuquerque
54 Nunes et al., 2020).

55 No SIPA, os efeitos únicos do processo de pastejo (desfolha e retorno de
56 excretas) são o “motor” das mudanças, capazes de alavancar diversos benefícios
57 ambientais através de melhorias na qualidade do solo (Carvalho et al., 2018). Nesses

58 sistemas, o solo é a base para a produção animal e vegetal, sendo responsável por capturar
59 e armazenar as modificações impostas pelo manejo (Anghinoni et al., 2013). Isto justifica
60 a atenção especial crescente nos últimos anos das pesquisas para uma compreensão mais
61 ampla dos impactos dos SIPA na qualidade do solo (Moraes et al., 2014a, b). Na literatura
62 atual, diversos estudos descreveram sobre os benefícios do pastejo em indicadores da
63 qualidade do solo físico-hídricos (Cecagno et al., 2016; Bonetti et al., 2019); biológicos
64 (Souza et al., 2010; Chávez et al., 2011) e químicos (Martins et al., 2016).

65 As melhorias na qualidade do solo provocadas pelo pastejo são respostas as
66 mudanças em quantidade e qualidade na matéria orgânica (Soussana; Lemaire, 2014;
67 Bardgett; Wardle, 2003) que, conseqüentemente, influenciam os atributos bioquímicos
68 (ex. ciclagem de nutrientes) e físico-hídricos (ex. infiltração, armazenamento e
69 disponibilidade de água e ar). Além disso, em áreas pastejadas o maior estímulo ao
70 crescimento das raízes pode atuar também diretamente favorecendo a estruturação do solo
71 (Cresswell e Kirkegaard, 1995; Ambus et al., 2018; Bodner et al., 2014). Essas respostas
72 sinérgicas complexas e intrínsecas da relação entre o solo, as plantas e os animais, atuam
73 de forma simultânea e são responsáveis por promover os principais serviços
74 ecossistêmicos derivados dessas interações.

75 Ainda são escassos os estudos a respeito de estratégias de fertilização em SIPA
76 (Moraes et al., 2014b). Isto representa um forte entrave a exploração desses sistemas, uma
77 vez que induz a manejos inadequados, principalmente, na fase pastagem. Em sucessões
78 lavoura-pastagem, é comum que a fertilização seja feita na lavoura, esperando que a
79 pastagem seja atendida pela “adubação residual” da fase anterior. Dessa forma, a
80 desatenção com a adubação do pasto compromete o crescimento da vegetação e, portanto,
81 o desempenho dos animais. Recentemente alguns estudos (Simões et al., 2023; Farias et
82 al., 2020; Pires et al., 2022) têm verificado que a adubação de sistema em SIPA realizada

83 durante a fase pastagem (momento de menor exportação de nutrientes) é uma alternativa
84 promissora para garantir a produção primária e melhorar a eficiência no uso de
85 fertilizantes. No entanto, ainda se desconhecem quais os processos e agentes envolvidos
86 na eficiência do uso de água e nutrientes com essa estratégia de adubação em SIPA.

87 Apesar de o solo ser um componente bastante explorado nas pesquisas em SIPA,
88 de forma geral esses estudos ainda estão sob uma abordagem multidisciplinar (Anghinoni
89 et al., 2013), como um conjunto de disciplinas que são tratadas separadamente. Este tipo
90 de avaliação desconsidera as relações existentes e a atuação simultânea dos processos e
91 agentes envolvidos no funcionamento de um SIPA, tornando os progressos científicos
92 limitados e até mesmo desconexos. Para a real compreensão do funcionamento do solo
93 em SIPA, os estudos devem ter abordagens que incluam as inter-relações entre
94 componentes biológicos, físico-hídricos e químicos do solo (Simões et al., 2023). Nesse
95 contexto, este estudo buscou avaliar e estabelecer as possíveis relações existentes entre a
96 qualidade físico-hídrica e bioquímica do solo com a eficiência de diferentes estratégias
97 de adubação em SIPA e em área sem pastejo.

98

99 **2. Material e Métodos**

100 **2.1 Local, clima e descrição do solo**

101 O experimento foi conduzido na Estação Experimental Agronômica da
102 Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA-UFRGS), localizada na cidade de
103 Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil (latitude 30°05'22" S, longitude 51°39'08" L
104 e altitude de 46m). O clima é subtropical úmido "Cfa" de acordo com a classificação de
105 Köppen, com médias anuais de 19°C de temperatura do ar e 1.500 mm de precipitação
106 pluvial. O solo da área foi classificado como Plintossolo Argilúvico Distrófico típico

107 (Streck et al., 2008). A classe textural do solo é franco-arenosa (160, 260 e 580 g de argila,
108 silte e areia, respectivamente).

109 A área experimental vem sendo conduzida desde 2003 em sistema integrado de
110 produção agropecuária em plantio direto. Em 2017 iniciou-se o atual protocolo
111 experimental em uma área de 4,4 ha dividida em 16 piquetes (parcelas experimentais).
112 Para o desenvolvimento deste estudo todos os dados foram coletados ao longo de uma
113 sucessão completa de azevém – soja, entre maio/2021 e maio/2022.

114 Durante o período experimental, a média de temperatura do ar foi de 20°C e a
115 precipitação pluvial acumulada foi de 828 mm, o que corresponde a um déficit de 672
116 mm comparado a média do acumulado de chuva na região. Em maio/2020, o solo
117 apresentava (0-20 cm) 8,1 g kg⁻¹ de carbono orgânico, 4,4 de potencial de hidrogênio
118 (pH) em água (1:1, v/v), 7,8 cmol_c dm⁻³ de capacidade de troca catiônica em pH 7,0 (CEC
119 pH 7,0), 33% e 26% de saturação por bases e por alumínio (Al) (CQFS-RS/SC, 2018).
120 Entre os anos de 2020 e 2021, o único manejo da fertilidade do solo foi a adubação com
121 nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) de acordo com as diferentes estratégias de
122 adubação exploradas nesta pesquisa. Em maio/2021 o solo apresentava 30 e 70 mg dm⁻³
123 de P e K disponíveis (extraídos por solução de Mehlich⁻¹), respectivamente.

124

125 **2.2. Delineamento experimental e tratamentos**

126 O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com 4 repetições em
127 esquema fatorial 2 x 2, sendo os tratamentos a interação entre dois sistemas de produção
128 em plantio direto e duas estratégias de adubação. Os sistemas de produção são (i) SIPA –
129 soja [*Glycine max* (L.) Merr.] em sucessão a uma pastagem de azevém (*Lolium*
130 *multiflorum* Lam.) pastejada por ovinos; e (ii) áreas sem pastejo, com soja no período
131 estival e azevém como cobertura na fase pastagem. As diferentes estratégias de adubação

132 correspondem a (i) adubação na lavoura, com fosforo (P) e potássio (K) aplicados na
133 semeadura da soja (novembro); e (ii) adubação de sistema, com P e K aplicadas no
134 estabelecimento da pastagem (maio).

135 Nas duas estratégias de adubação foi aplicado 150 kg N ha⁻¹ na forma de ureia
136 durante o estabelecimento do azevém. A adubação de P e K foi calculada baseada na
137 expectativa de exportação de uma produção de 2,5 Mg ha⁻¹ de soja, correspondente a
138 produtividade média nas duas safras anteriores. Assim, foram aplicados 15 kg P ha⁻¹ e 42
139 kg K ha⁻¹, usando como fontes desses nutrientes o superfosfato triplo e cloreto de potássio,
140 respectivamente (CQFS-RS/SC, 2016).

141

142 **2.2.1 Manejo das diferentes fases de produção**

143 **2.2.1.1 Fase pastagem**

144 No ano de 2021, a fase pastagem iniciou com a semeadura do azevém (*Lolium*
145 *multiflorum* Lam.) ocorrida no final de abril, com a cultivar BRS Ponteio (dose de 25 kg
146 ha⁻¹ de sementes viáveis e puras). No SIPA a herbivoria foi realizada por ovinos jovens
147 (10 meses) da raça Corriedale, com aproximadamente 29 ± 6,47 kg de peso vivo. Na área
148 sem pastejo o azevém foi mantido apenas como planta de cobertura. O manejo do pasto
149 foi feito considerando a maximização da produção animal através da manutenção da
150 estrutura do dossel em 15 cm de altura, segundo o conceito do rotatínuo (["*Rotatínuous*"
151 conceito, de de Faccio Carvalho (2013)]. Para isso, foram feitas semanalmente, 150
152 pontos de altura do pasto por piquete. O método de pastoreio foi por lotação contínua,
153 pela metodologia "*put-and-take*" (Mott e Lucas, 1952). A fase de pastejo foi do início de
154 julho ao início de novembro (118 dias). Ao final do ciclo, o azevém foi dessecado com
155 Glifosato (4 L ha⁻¹).

156

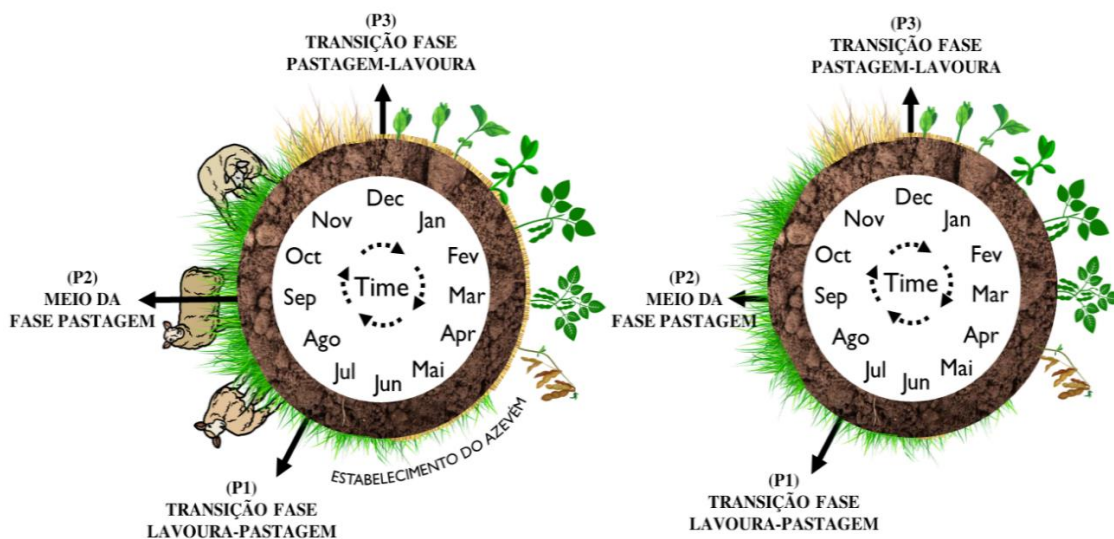
157 **2.2.1.2. Fase lavoura**

158 Para fase de lavoura utilizou-se a cultura da soja com a cultivar pré-comercial
 159 BRS 6105 RR. As sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* (70 ml de
 160 produto comercial para cada 50 kg de sementes). A semeadura aconteceu no dia 2 de
 161 dezembro de 2021, com população de 12 sementes por metro linear e espaçamento entre
 162 linhas de 45 cm, visando uma densidade de 255.000 plantas ha⁻¹. Sempre que houve
 163 necessidade de intervenção com produtos químicos (herbicidas, inseticidas e fungicidas),
 164 estas foram realizadas de acordo com as recomendações técnicas oficiais. A colheita foi
 165 realizada em 22 de abril de 2022, totalizando um ciclo de 141 dias.

166

167 **2.3 Avaliações e coletas de solo**

168 As avaliações e coletas de solo ocorreram em 3 períodos distintos, onde P1 –
 169 transição lavoura-pastagem (julho/2021), P2 – meio da fase pastejo (setembro/2021) e P3
 170 – transição pastagem-lavoura (dezembro/2021), conforme elucidado na Figura 1.



171

Figura 2. Representação esquemática e cronológica das diferentes épocas de avaliações dos indicadores físico-hídricos e bioquímicos da qualidade do solo nos diferentes

sistemas de produção (SIPA e área sem pastejo). P1 – transição lavoura-pastagem (julho), P2 – meio da fase pastejo (setembro), P3 – transição pastagem-lavoura (dezembro).

172 As amostragens físicas e bioquímicas foram realizadas na profundidade de 0 a 10
173 cm, devido à importância desta camada no diagnóstico da fertilidade do solo,
174 armazenamento e controle de diversos processos ambientais e agronômicos (Reynolds et
175 al., 2009). Foi coletada uma amostra composta por cinco subamostras deformadas (0-10
176 cm) aleatoriamente em cada piquete (parcela) para determinação da distribuição
177 granulométrica (Teixeira et al., 2017).

178

179 **2.3.1. Avaliações físico-hídricas do solo**

180 Foram realizados três testes de infiltração por tratamento, totalizando 36 testes
181 nos três períodos avaliados (P1, P2 e P3). Os testes foram realizados conforme descrito
182 em Lassabatère et al. (2006), com cilindro de diâmetro interno de 15 cm, inserido no solo
183 a uma profundidade de 1 cm para evitar o escoamento de água pelas laterais. Para cada
184 teste foi coletada uma amostra deformada em local próximo para determinação da
185 umidade inicial (θ_0). Ao final do teste foi realizada a coleta de uma amostra indeformada
186 (10 cm de diâmetro \times 10 cm de altura) para avaliação da densidade do solo seco e umidade
187 final (θ_s), adotando-se θ_s como a porosidade total. As amostras foram armazenadas em
188 bandejas de alumínio para manter a umidade do momento da coleta. Em seguida, foram
189 levados ao laboratório, onde foram pesados e colocados em estufa a 105 °C até atingir
190 peso constante, conforme Teixeira et al. (2017).

191 O método de Beerkan foi utilizado para caracterizar as condições físico-hídricas
192 do solo (Lassabatère et al., 2006). Logo, estima-se simultaneamente os parâmetros de
193 retenção de água (van Genuchten, 1980, Eq.1) e a condutividade hidráulica do solo

194 (Brooks e Corey, 1964, Eq.2) com a condição de Burdine (1953):

$$195 \quad \theta(h) = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} \quad \text{e} \quad m = 1 - \frac{2}{n} \quad (\text{Eq.1})$$

196

$$197 \quad K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad \text{e} \quad \eta = \frac{2}{mn} + 2 + p \quad (\text{Eq.2})$$

198 onde θ é o teor volumétrico de água no solo [$L^3 L^{-3}$]; θ_r e θ_s são os teores volumétricos de
 199 água do solo residual e saturado [$L^3 L^{-3}$], respectivamente; h é a carga de pressão da água
 200 no solo [L]; h_g [L] é o valor de escala de h ; n , m e η são parâmetros de forma; p é o
 201 parâmetro de tortuosidade igual a 1 (Burdine, 1953); K_s é a condutividade hidráulica
 202 saturada do solo [$L T^{-1}$]. θ_r é assumido como zero; θ_s foi medido ao final de cada teste de
 203 infiltração a partir das coletas de solo.

204 O algoritmo utilizado para estimar os parâmetros de transferência do solo por meio
 205 de experimentos de infiltração, denominado método de estimativa de Beerkan (BEST),
 206 estima os parâmetros de forma (n e η) assumindo que as funções de distribuição
 207 granulométrica e de retenção de água são semelhantes. Os parâmetros de escala, h_g , K_s e
 208 θ_s , foram determinados por testes de infiltração, usando a fórmula analítica definida por
 209 Haverkamp et al. (1994) para infiltração cumulativa 3D $I(t)$ e taxa de infiltração $q(t)$,
 210 descrita pelas equações transitória e de estado estacionário, respectivamente [ver
 211 Lassabatère et al. (2006) para mais detalhes]. O algoritmo BEST-Slope foi selecionado
 212 nesta pesquisa com base no melhor desempenho no ajuste dos dados do modelo de
 213 infiltração cumulativa transiente para todos os 36 testes de infiltração.

214 Para avaliar a qualidade físico-hídrica do solo, foram utilizados nove indicadores
 215 selecionados da literatura (Iovino et al., 2016; Reynolds et al., 2007; 2009; Topp et al.,
 216 1997; Cherubin et al., 2016a; Cherubin et al., 2016b): densidade do solo (D_s); porosidade
 217 total (PT); condutividade hidráulica saturada (K_s); capacidade de água disponível para

218 planta (CADP); capacidade de campo relativa (CCR); macroporosidade (P_{mac});
219 capacidade de aeração (CA); índice de estabilidade estrutural do solo (IEE) e grau de
220 compactação do solo (GCS). O CADP, CCR, P_{mac} e CA foram determinados de acordo
221 com (Reynolds et al., 2007; Reynolds et al., 2009), através de modelos descritos em
222 Simões et al. (2023). O IEE foi calculado a partir do modelo $IEE = (\text{carbono orgânico do}$
223 $\text{solo} \times 1,724) / (\text{silte} + \text{argila}) \times 100$ (Reynolds et al., 2009). O GCS foi determinado
224 como $GCS = (D_s / D_s \text{ max}) \times 100$, onde $D_s \text{ max}$ é a densidade aparente máxima, estimada
225 usando a função de pedotransferência descrita por Marcolin e Klein, (2011).

226

227 **2.3.2. Avaliações bioquímicas do solo**

228 Foi coletada uma amostra composta por cinco subamostras deformadas (0-10 cm)
229 em cada parcela experimental, totalizando 36 coletas nos três períodos avaliados (P1, P2
230 e P3). Posteriormente, as amostras foram armazenadas a cerca de $3 \pm 1^\circ\text{C}$ até o momento
231 da análise. Os teores de carbono e nitrogênio da biomassa microbiana (CBM e NBM,
232 respectivamente) foram avaliados por meio do método de irradiação-extração, descrito
233 por Mendonça e Matos (2017) e adaptado de Islam e Weil (1998) e Brookes, Powlson e
234 Jenkinson (1982). Para isso, duas subamostras em duplicata foram avaliadas por
235 tratamento, totalizando quatro subamostras finais cada uma com 20 g de solo. Uma
236 subamostra em duplicata foi irradiada por 2 minutos e 40 segundos, enquanto a outra
237 subamostra permaneceu sem irradiação. Em seguida, foram adicionados 80 mL de sulfato
238 de potássio (K_2SO_4) e colocadas as subamostras para agitadas por 30 minutos. Após 12
239 horas de decantação, o extrato sobrenadante de cada subamostra foi filtrado e a
240 quantidade de carbono e nitrogênio microbiano foi determinada de acordo com o método
241 descrito por Tedesco et al. (1995).

242 Foi utilizado o método proposto por Walkley e Black (1934) para determinar o
 243 carbono orgânico total (COT). A atividade da enzima β -glicosidase (BG: β) foi
 244 determinada a partir da metodologia proposta por Eivazi e Tabatabai (1988). Para
 245 avaliação da enzima arilsulfatase (ARS) foi utilizado o procedimento descrito por
 246 Tabatabai e Bremner (1970).

247

248 **2.4 Índice de Qualidade do Solo (IQS)**

249 O IQS foi desenvolvido em três etapas, conforme descrito por Cherubin et al.,
 250 (2016a, b). A primeira etapa consistiu na seleção dos indicadores. Foram selecionados
 251 nove indicadores físico-hídricos (Ds, PT, CADP, CCR, P_{mac} , CA, Ks, ISS e GCS) e cinco
 252 indicadores bioquímicos (CBM, NBM, COT, BG: β e ARS) com base na literatura
 253 publicada (Reichert; Reinert; Braida, 2003; Reichert et al., 2009; Reynolds et al., 2007;
 254 2009; Lopes et al., 2013; Cherubin et al., 2016a). Na segunda etapa, os valores dos
 255 indicadores foram transformados usando funções de pontuação não lineares. Os
 256 indicadores foram pontuados usando uma das seguintes curvas: "mais é melhor" (curva
 257 sigmóide assíntota superior), "menos é melhor" (curva sigmóide assíntota inferior) e
 258 "ponto médio ideal" (curva gaussiana). As equações não lineares (Eq.3) e (Eq.4) foram
 259 usados para as formas de curva de pontuação "mais é melhor" e "menos é melhor",
 260 respectivamente. Para a curva "ponto médio ideal", as equações 3 e 4 foram usadas juntas
 261 nas partes crescentes e decrescentes da curva.

262

$$263 \quad Pontuação = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{B - UB}{x - UB}\right)^S\right]} \quad (Eq. 3)$$

264

$$265 \quad \text{Pontuação} = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{B - LB}{x - LB}\right)^S\right]} \quad (\text{Eq. 4})$$

266

267 onde, Pontuação é o valor sem unidade do indicador de solo que varia de 0 a 1, a é a
 268 pontuação máxima que foi igual a 1 neste estudo, B é o valor da linha de base do indicador
 269 de solo onde a pontuação é igual a 0,5, LB é o limite inferior, UB é o limite superior, x é
 270 o valor indicador do solo medido e S é a inclinação da equação definida como -2,5.

271 Os limites críticos e a linha de base para cada indicador da qualidade do solo foram
 272 definidos usando referências da literatura, conforme mostrado na Tabela 1.

273

Tabela 3. Limites críticos e curvas de pontuação de acordo com o indicador de qualidade do solo.

Indicador	Unidade	Limite inferior	Linha de base	Limite superior	Ponto ótimo	Curva de pontuação
Físico-hídricas						
D_s^\dagger	Mg m^{-3}	1.5	1.65	1.8	-	Menos é melhor
PT^\clubsuit	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	0.2	0.35	0.5	-	Mais é melhor
$CADP^\clubsuit$	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	0.1	0.15	0.2	-	Mais é melhor
CCR^\clubsuit	DN	-	0.6 e 0.7	-	0.65	Ótimo
P_{mac}^\clubsuit	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	-	0.04	0.07	-	Mais é melhor
CA^\clubsuit	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	-	0.1	0.14	-	Mais é melhor
K_s^\clubsuit	mm^{-1}	-	0.001 e 0.1	-	$0.005 \leq K_s \leq 0.05$	Ótimo
IEE^\clubsuit	%	5	7	9	-	Mais é melhor
GCS^\clubsuit	%	80	90	100	-	Menos é melhor
Bioquímicos						
CBM^\clubsuit	mg kg^{-1}	200	275	350	-	Mais é melhor
NBM^\clubsuit	mg kg^{-1}	20	27,5	35	-	Mais é melhor
COT^\clubsuit	g kg^{-1}	10	17,5	25	-	Mais é melhor
$BG:\beta^\clubsuit$	$\text{mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$	60	90	120	-	Mais é melhor
ARS^\heartsuit	$\text{mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$	40	65	95	-	Mais é melhor

274 ♦Reichert; Reinert; Braida, (2003); Reichert et al. (2009); ♦Reynolds et al. (2007; 2009);
 275 ♦Cherubin et al. (2016a); ♥Lopes et al. (2013). D_s , densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$); PT,
 276 porosidade total ($m^3\ m^{-3}$); CADP, capacidade de água disponível para a planta ($m^3\ m^{-3}$);
 277 CCR, capacidade de campo relativa (ND, não dimensionável); P_{mac} , macroporosidade (m^3
 278 m^{-3}); CA, capacidade de aeração ($m^3\ m^{-3}$); K_s , condutividade hidráulica saturada ($mm\ s^{-1}$);
 279 IEE, índice de estabilidade estrutural do solo (%); GCS, grau de compactação do solo
 280 (%); CBM, carbono da biomassa microbiana ($mg\ kg^{-1}$); NBM, nitrogênio da biomassa
 281 microbiana ($mg\ kg^{-1}$); COT, carbono orgânico total ($g\ kg^{-1}$); BG:β, atividade da β-
 282 glicosidase ($mg\ kg^{-1}\ h^{-1}$) e ARS, arilsulfatase ($mg\ kg^{-1}\ h^{-1}$).

283

284 Na terceira etapa, as pontuações dos indicadores foram integrados a um índice de
 285 qualidade do solo usando o método aditivo ponderado (Eq. 5), conforme descrito por
 286 Cherubin et al. (2016a).

$$287 \quad IQS = \sum_{i=1}^n WiSi \quad (Eq. 5)$$

288 onde, Si é a pontuação do indicador, n o número de indicadores integrados no índice e Wi
 289 o valor ponderado dos indicadores. Os indicadores foram ponderados de acordo com uma
 290 estrutura desenvolvida com base em três funções do solo (Tabela 2), conforme sugerido
 291 por Cherubin et al. (2016a) e Lima et al. (2013).

292 Para cada período de avaliação (P1, P2 e P3), foram calculados índices que
 293 representassem as funções agronômicas e ambientais e, em seguida, as pontuações dessas
 294 funções foram integradas em um único índice de qualidade do solo (IQS). Posteriormente,
 295 foram obtidos índices representativos para todo o período experimental, a partir das
 296 médias dos índices específicos das funções e do índice de qualidade do solo de todos os
 297 períodos avaliados.

Tabela 4. Quadro de funções do solo e indicadores usados para desenvolver o índice de qualidade do solo.

Funções do solo	Peso	Subfunção	Peso	Nível 1	Peso	Nível 2	Peso		
F(i) – Manutenção da microbiota e ciclagem de nutrientes	0,334	Biomassa microbiana	0,5	COT	0,2				
				CBM		0,4			
		Atividade enzimática	0,5	NBM	0,4				
				BG:β	0,5				
				ARS	0,5				
F(ii) – Infiltração, armazenamento e disponibilidade de água e ar	0,333	Infiltração de água	0,25	K _s	0,7				
				Indicadores correlacionados		0,3	COT	0,15	
		Armazenamento e disponibilidade de água	0,25	CADP	0,4	D _s	0,15		
				CCR		0,4			
				Indicadores correlacionados		0,2	PT	0,2	
		Aeração do solo	0,5	P _{mac}	0,4				
				CA		0,4			
				Indicadores correlacionados			PT	0,2	
		F(iii) – Sustentação do crescimento das plantas e resistência à degradação	0,333	Compactação do solo	0,4	D _s	0,35		
						GCS		0,35	
Indicadores correlacionados						COT		0,1	
Estabilidade estrutural	0,4					PT		0,2	
IEE	1								
Condutividade hidráulica na saturação	0,2	K _s	1						

Ds, densidade do solo; PT, porosidade total; CADP, capacidade de água disponível para a planta; CCR, capacidade de campo relativa;

P_{mac} , macroporosidade; CA, capacidade de aeração; K_s , condutividade hidráulica saturada; IEE, índice de estabilidade estrutural do solo; GCS, grau de compactação do solo; CBM, carbono da biomassa microbiana; NBM, nitrogênio da biomassa microbiana; COT, carbono orgânico total; BG: β , atividade da β -glicosidase e ARS, arilsulfatase.

2.5 Avaliações de produção primária

A produção total de forragem (kg ha^{-1} de matéria seca – MS), quando em área sem pastejo foi medida pela biomassa total acumulada. Enquanto que em SIPA somou-se a biomassa da forragem do primeiro dia de pastejo com as taxas diárias de acúmulo da forragem durante todo ciclo de pastejo. A taxa diária de acúmulo de forragem foi avaliada a cada 28 dias utilizadas gaiolas de exclusão de pastejo, conforme protocolo padrão que foi descrito por Farias et al. (2020). A produtividade da soja (kg ha^{-1}) foi determinada na maturidade plena (Estágio fenológico - R8) dos grãos com 13% de umidade, sendo coletadas 4 sub amostras aleatórias de um metro linear por parcela.

2.6 Análise dos dados

Os pressupostos da análise de variância (ANOVA) foram atingidos (normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($P > 0,05$), homogeneidade de variância pelo teste de Bartlett ($P > 0,05$) e análise visual residual). Quando necessário, os dados foram transformados elevando a variável à potência de lambda. O valor lambda apropriado foi obtido através da realização de uma análise de transformação Box-Cox.

ANOVA foi realizada a um nível de significância de 5% ($P < 0,05$) usando um modelo misto pela função LMER do pacote lme4 no software R (R Core Team, 2013). Os indicadores de solo foram analisados considerando como efeitos fixos o sistema de produção (SIPA vs. área sem pastejo), a estratégia de fertilização (adubação na lavoura

vs. adubação de sistema), o período de avaliação (P1, P2 e P3) e suas respectivas interações. Nesse modelo os blocos representaram o efeito aleatório. Para os índices que representaram as funções do solo (Fi, Fii e Fiii) e o índice de qualidade do solo foram considerados os mesmos efeitos fixos dos indicadores, entretanto os piquetes (parcelas experimentais) representaram o efeito aleatório.

O sistema de produção, a estratégia de adubação e sua interação foram considerados como efeitos fixos, e o bloco como efeito aleatório sobre a produção de forragem e produtividade da soja. Para identificar o modelo com melhor qualidade de ajuste aos dados foi utilizada a abordagem Akaike Information Criterion (AIC). Quando detectadas diferenças, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey. Análise de correlação de Pearson (r) a nível de 5% foram realizadas entre os índices das funções do solo (Fi, Fii e Fiii) e o índice de qualidade do solo com a produção de forragem e soja.

3. Resultados

3.2 Indicadores de qualidade do solo

Não foram verificados efeitos significativos da interação entre as estratégias de adubação, sistemas de produção e períodos de avaliação nos indicadores físico-hídricos e bioquímicos da qualidade do solo (Tabela 4). No entanto, observou-se interação significativa entre as estratégias de fertilização e sistemas de produção para a capacidade de água disponível para planta, capacidade de campo relativa e o índice de estabilidade estrutural. Além disso, houve também interação entre os sistemas de produção e períodos de avaliação para as variáveis densidade do solo, porosidade total, capacidade de água disponível para as plantas, capacidade de campo relativa, macroporosidade, capacidade de aeração e grau de compactação do solo. A β -glicosidase, o carbono e o nitrogênio da biomassa microbiana foram afetados exclusivamente pelos períodos de avaliação. A

arilsulfatase e a condutividade hidráulica saturada, foram significativamente influenciadas pelos sistemas de produção independentemente dos demais fatores estudados.

Tabela 3. Análise de variância das estratégias de adubação (F) (adubação de cultivo e adubação de sistema), sistemas de produção (S) (SIPA e área sem pastejo), períodos de avaliação (P) (transição lavoura-pastagem, meio do ciclo de pastejo e transição pastagem-lavoura) e seus efeitos nos indicadores de qualidade física e bioquímica do solo.

Indicador [§]	Unidades	Efeitos						
		F	S	P	F x S	F x P	S x P	F x S x P
Físico-hídricos								
D _s	Mg m ⁻³	ns	ns	ns	ns	Ns	*	ns
PT	m ³ m ⁻³	ns	ns	ns	ns	Ns	*	ns
CADP	m ³ m ⁻³	**	ns	ns	***	Ns	***	ns
CCR	DN	**	ns	***	*	Ns	***	ns
P _{mac}	m ³ m ⁻³	ns	ns	**	ns	Ns	***	ns
CA	m ³ m ⁻³	ns	ns	**	ns	Ns	**	ns
K _s	mm ⁻¹	ns	*	ns	ns	Ns	ns	ns
IEE	%	*	ns	ns	***	Ns	ns	ns
GCS	%	ns	ns	ns	ns	Ns	*	ns
Bioquímicos								
CBM	mg kg ⁻¹	ns	ns	*	ns	Ns	ns	ns
NBM	mg kg ⁻¹	ns	ns	***	ns	Ns	ns	ns
COT	g kg ⁻¹	ns	ns	ns	ns	Ns	ns	ns
BG:β	mg kg ⁻¹ h ⁻¹	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
ARS	mg kg ⁻¹ h ⁻¹	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns

D_s, densidade do solo; PT, porosidade total; CADP, capacidade de água disponível para a planta; CCR, capacidade de campo relativa; P_{mac}, macroporosidade; CA, capacidade de aeração; K_s, condutividade hidráulica saturada; IEE, índice de estabilidade estrutural do solo; GCS, grau de compactação do solo; CBM, carbono da biomassa microbiana; NBM, nitrogênio da biomassa microbiana; COT, carbono orgânico total; BG:β, atividade da β-

glicosidase e ARS, arilsulfatase. *Significativo em $P \leq 0,05$; ** Significativo em $P \leq 0,01$; *** Significativo em $P \leq 0,001$; ns não significativo.

A densidade do solo, a porosidade total e o grau de compactação do solo foram significativamente afetados pelas ações específicas do pastejo durante o meio da fase pastagem (Tabela 5). Nessa ocasião, somente as áreas de SIPA apresentaram alterações nessas variáveis comparado ao período de transição lavoura-pastagem, sendo observada uma redução da densidade do solo e, conseqüentemente, do grau de compactação, com aumento respectivo na porosidade total. Essas mudanças estruturais do solo repercutiram na maior estabilidade do SIPA quanto a variabilidade temporal para a capacidade de água disponível para planta, capacidade de campo relativa, macroporosidade e capacidade de aeração. Para essas variáveis somente foram observadas diferenças no tempo com a área sem pastejo.

Nos sistemas de cultivo a capacidade de água disponível para planta e a capacidade de campo relativa reduziram significativamente no meio da fase pastagem e na transição pastagem-lavoura comparado ao período de transição lavoura-pastagem. Em compensação, no meio da fase pastagem e na transição pastagem-lavoura, esses sistemas aumentaram a macroporosidade e a capacidade de aeração dos solos.

Tabela 4. Valores médios dos indicadores físicos e bioquímicos do solo (0–10 cm de profundidade) nos diferentes sistemas de produção (SIPA e área sem pastejo - SP), estratégias de adubação (adubação de sistema e adubação da lavoura) e períodos de avaliação em um Plintossolo Argilúvico Distrófico típico.

Indicador	1) Interação entre períodos de avaliação e sistemas de produção					
	Transição lavoura-pastagem		Meio da fase pastagem		Transição pastagem-lavoura	
	SIPA	SP	SIPA	SP	SIPA	SP

Ds	1,19 Aa	1,15 Aa	1,03 Bb	1,16 Aa	1,10 ABa	1,10 Aa
PT	0,55 Ba	0,57 Aa	0,61 Aa	0,56 Ab	0,58 ABa	0,59 Aa
CADP	0,16 Ab	0,19 Aa	0,19 Aa	0,15 Bb	0,18 Aa	0,15 Bb
CCR	0,59 Ab	0,7 Aa	0,62 Aa	0,55 Bb	0,62 Aa	0,54 Bb
P _{mac}	0,08 Aa	0,04 Bb	0,09 Aa	0,13 Aa	0,07 Ab	0,15 Aa
CA	0,22 Aa	0,17 Bb	0,23 Aa	0,25 Aa	0,21 Ab	0,27 Aa
GCS	61 Aa	59 Aa	53Bb	60 Aa	57 ABa	57 Aa
2) Efeito isolado dos períodos de avaliação						
CBM	155 B		210 AB		254 A	
NBM	6,4 B		14,3 A		16,6 A	
BG:β	96 B		101 B		164 A	
3) Interação entre as estratégias de adubação e sistemas de produção						
	Adubação de sistema		Adubação na lavoura			
	SIPA	SP	SIPA	SP		
CADP	0,2 Aa	0,16 Ab	0,15 Bb	0,17 Aa		
CCR	0,65 Aa	0,6 Ab	0,57 Ba	0,6 Aa		
IES	7,27 Aa	5,65Ab	5,16 Ba	5,81 Aa		
4) Efeito isolado dos sistemas de produção						
	Sistemas de produção					
	SIPA	SP				
K _s	0,01 b	0,03 a				
ARS	131 a	104 b				

Ds, densidade do solo (Mg m^{-3}); PT, porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); CADP, capacidade de água disponível para a planta ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); CCR, capacidade de campo relativa (ND, não dimensionável); P_{mac}, macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); CA, capacidade de aeração ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); K_s, condutividade hidráulica saturada (mm s^{-1}); IEE, índice de estabilidade estrutural do solo (%); GCS, grau de compactação do solo (%); CBM, carbono da biomassa microbiana (mg kg^{-1}); NBM, nitrogênio da biomassa microbiana (mg kg^{-1}); COT, carbono orgânico total (g kg^{-1}); BG:β, atividade da β-glicosidase ($\text{mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$) e ARS, arilsulfatase ($\text{mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$).

1) As letras maiúsculas comparam os períodos em cada sistema de produção e letras minúsculas comparam diferentes sistemas de produção dentro de cada período. 2) As letras maiúsculas comparam períodos independentemente do sistema de produção ou estratégia de adubação. 3) As letras maiúsculas comparam as estratégias de adubação em cada sistema de produção e letras minúsculas comparam diferentes sistemas de produção dentro de cada estratégia de adubação. 4) As letras minúsculas comparam os diferentes

sistemas independente dos outros fatores avaliados. As médias seguidas pelas mesmas letras não diferem pelo teste de Tukey em $P \leq 0,05$.

Durante a avaliação do meio da fase pastagem, verificou-se menor densidade e grau de compactação do solo e maior porosidade total no SIPA comparado a área sem pastejo ($p < 0,05$). O SIPA apresentou a menor capacidade de água disponível para as plantas e capacidade de campo relativa comparado a área sem pastejo durante a transição entre a lavoura e a pastagem. Nesse momento, em função do rearranjo das partículas do solo após o ciclo da soja, no SIPA ocorreu um aumento na quantidade de poros maiores (P_{mac} e CA) e uma redução respectiva na quantidade de poros menores ($CADP$ e CCR). Essas características estruturais do solo resultaram em maior macroporosidade e capacidade de aeração no SIPA comparado a área sem pastejo durante a transição lavoura-pastagem. A partir da ação do animal em pastejo ocorreram mudanças estruturais no solo que asseguraram a maior capacidade de água disponível para as plantas e capacidade de campo relativa ao SIPA comparado a área sem pastejo, durante o meio do ciclo da fase pastagem e na implantação da lavoura.

O carbono e o nitrogênio da biomassa microbiana aumentaram durante a fase pastagem, ocorrendo acréscimos na biomassa dos microrganismos a partir da avaliação do meio da fase pastagem, independentemente dos sistemas de produção e estratégias de adubação. A variabilidade temporal influenciou também a atividade enzimática no solo, sendo constatada a maior atividade da β -glicosidase durante a transição pastagem-lavoura.

A interação entre o SIPA e a adubação de sistema aumentou a capacidade de água disponível para as plantas e a capacidade de campo relativa no solo. Por outro lado, os efeitos benéficos do pastejo nos atributos físicos-hídricos do solo, especificamente a

capacidade de água disponível e capacidade de campo relativa, foram neutralizados quando a pastagem não recebeu adubação (P e K). Além disso, na adubação da lavoura a capacidade de água disponível para as plantas no SIPA foi inferior ($p < 0,05$) a área sem pastejo. Quando a adubação com P e K foi realizada na lavoura, os efeitos benéficos dos animais em pastejo além de serem neutralizados, representaram uma menor capacidade do solo em disponibilizar água para as plantas. Esses resultados mostraram-se estar em concordância com a maior estabilidade estrutural dos solos no SIPA com adubação de sistemas, sugerindo que há uma relação entre a interação dos efeitos do pastejo em pastagens adubadas (P e K) com a maior estabilidade estrutural do solo e a retenção de água para as plantas.

A condutividade hidráulica saturada e a arilsulfatase foram afetadas apenas pelos sistemas de produção. A área sem pastejo favoreceu a maior condutividade hidráulica saturada nos solos quando comparado ao SIPA. Por outro lado, a maior atividade da arilsulfatase foi constatada no SIPA independentemente dos períodos de avaliação e estratégias de adubação.

3.2 Índices de qualidade do solo

A estabilidade estrutural do solo, o armazenamento e disponibilidade de água para as plantas foram significativamente influenciadas pelos efeitos da interação entre os sistemas de produção e estratégias de adubação (Figura 2a). Não foram verificados efeitos ($p < 0,05$) isolados ou interação para os sistemas de produção, estratégias de adubação e período de avaliação com as outras subfunções do solo. O armazenamento e a disponibilidade de água para as plantas foram favorecidos pelos efeitos do pastejo em áreas adubadas na fase pastagem, sendo verificadas pontuações equivalentes a 0,93 nesses sistemas, enquanto que a adubação de sistema em áreas exclusivas para produção agrícola

e em SIPA com a adubação realizada na lavoura as pontuações reduziram para 0,61 e 0,51, respectivamente (Figura 2b). O SIPA com adubação de sistema também apresentou a maior pontuação para a estabilidade estrutural do solo (0,62), comparado a área sem pastejo com adubação de sistema (0,24) e ao SIPA com adubação convencional (0,14) (Figura 2c). Esses resultados indicaram que embora o manejo do pasto seja realizado a partir da manutenção da altura média do azevém em 15 cm, independentemente da estratégia de adubação, a dinâmica dos processos é alterada em função da ausência de adubação com P e K nas pastagens.

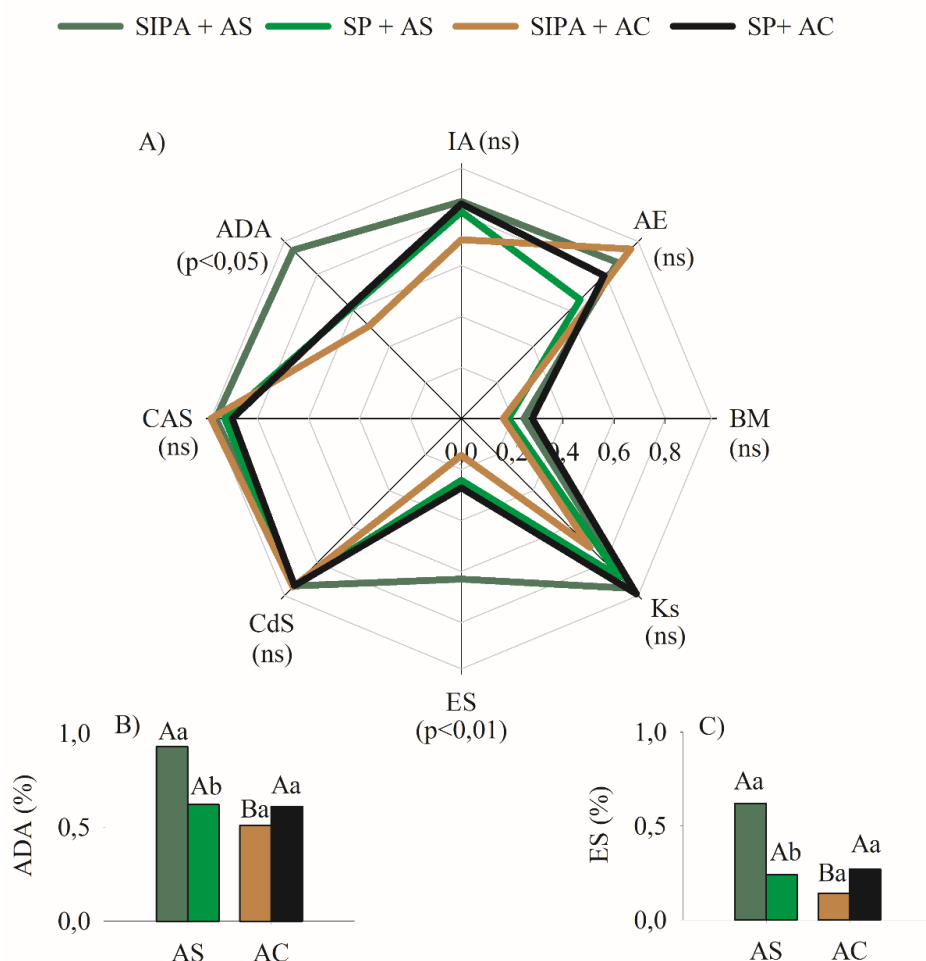


Figura 2. Pontuações das subfunções do solo (0 a 10 cm de profundidade) ao longo do ano-safra sob o sistema de integração lavoura-pecuária (SIPA) ou área sem pastejo (SP)

com adubação de sistema (AS) ou adubação de cultura (AC). Biomassa microbiana (BM); Atividade enzimática (AE); Infiltração de água (IA); Armazenamento e disponibilidade de água (ADA); Capacidade de aeração do solo (CAS); Compactação do solo (CdS); Estabilidade estrutural (ES); Condutividade hidráulica na saturação (K_s). Não significativo (ns). As letras maiúsculas comparam as estratégias de adubação em cada sistema de produção e letras minúsculas comparam diferentes sistemas de produção dentro de cada estratégia de adubação. As médias seguidas pelas mesmas letras não diferem pelo teste de Tukey em $P \leq 0,05$.

A partir da integração das subfunções do solo em suas respectivas funções denominadas neste estudo como manutenção da microbiota e ciclagem de nutrientes (Fi), infiltração, armazenamento e disponibilidade de água e ar (Fii), e sustentação do crescimento das plantas e resistência à degradação (Fiii), foram observados apenas efeitos da interação dos sistemas de produção e estratégias de adubação para a capacidade do solo em sustentar o crescimento das plantas e resistir à degradação (Figura 3a). O SIPA com adubação de sistema apresentou o maior potencial na manutenção do crescimento das plantas e resistência a degradação ($p < 0,05$), com pontuação equivalente a 0,81, enquanto que a área sem pastejo com adubação de sistema e o SIPA com adubação na lavoura apresentaram pontuações de 0,64 e 0,57, respectivamente (Figura 3b).

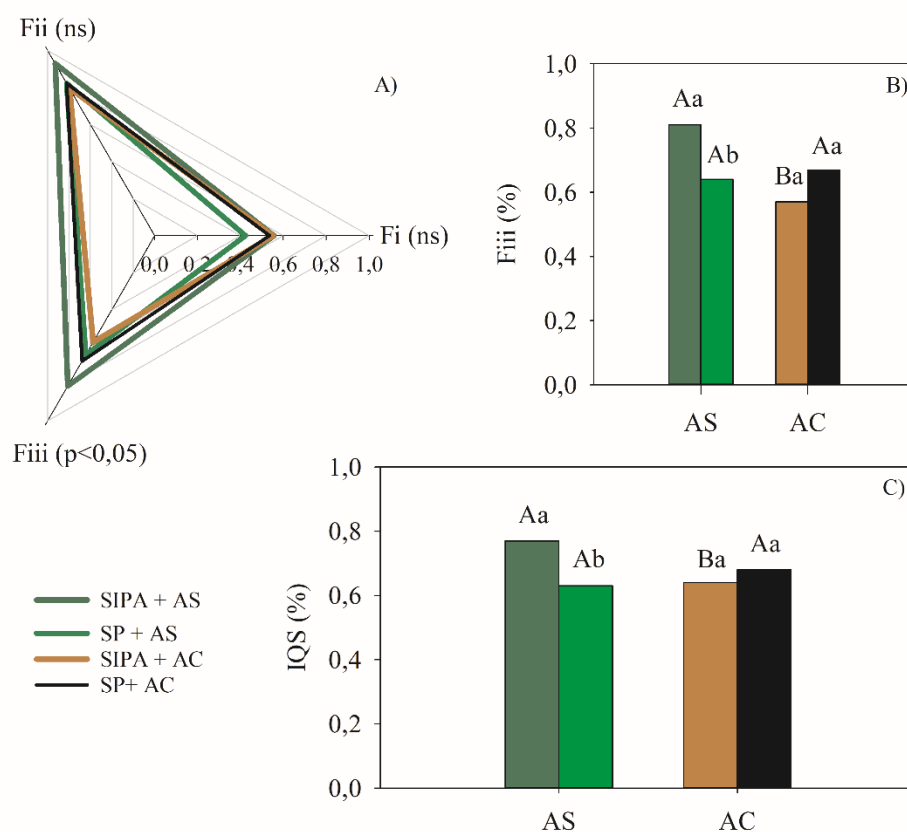


Figura 3. Pontuações das funções do solo (0 a 10 cm de profundidade) e do índice de qualidade do solo (IQS) ao longo do ano-safra sob o sistema de integração lavoura-pecuária (SIPA) ou área sem pastejo (SP) com adubação de sistema (AS) ou adubação de cultura (AC). Manutenção da microbiota e ciclagem de nutrientes (Fi); Infiltração, armazenamento e disponibilidade de água e ar (Fii); Sustentação do crescimento das plantas e resistência à degradação (Fiii). Índice de qualidade do solo (IQS). Não significativo (ns). As letras maiúsculas comparam as estratégias de adubação em cada sistema de produção e letras minúsculas comparam diferentes sistemas de produção dentro de cada estratégia de adubação. As médias seguidas pelas mesmas letras não diferem pelo teste de Tukey em $P \leq 0,05$.

Embora a subfunção do solo relacionada ao armazenamento e à disponibilidade de água para as plantas ter sido afetada pela interação dos sistemas de produção e

estratégias de adubação, a infiltração de água e a capacidade de aeração dos solos não foram influenciadas pela interação desses fatores. Essa equidade resultou na ausência de efeitos significativos entre a interação dos sistemas de produção e estratégias de adubação na função física do solo referente aos aspectos hídricos e de aeração (Fii).

A adubação de sistema na integração lavoura-pecuária é uma estratégia de manejo capaz de influenciar positivamente o índice de qualidade do solo (IQS) (Figura 3c). Quando o manejo da adubação foi realizado na fase pastagem do SIPA, o índice que integra todas as funções do solo (Fi, Fii e Fiii) exploradas neste estudo revelou uma pontuação de 0,77, superior ($p < 0,05$) a área sem pastejo com adubação de sistema (0,63) e ao SIPA com adubação na lavoura (0,64). Esses resultados representam uma redução de 14 e 13%, respectivamente, na capacidade dos solos dos sistemas de cultivo adubados na pastagem e do SIPA adubado na lavoura desempenhar suas funções bioquímicas e físico-hídricas do solo comparado ao SIPA com adubação de sistema.

As descobertas deste estudo demonstraram também uma variabilidade temporal na qualidade do solo independente dos sistemas de produção e estratégias de adubação, a menor qualidade do solo foi após o ciclo da soja e início da fase pastagem (0,62), ocorrendo aumento significativo a partir do meio da fase pastagem (0,69), o que persistiu até o período de transição pastagem-lavoura (0,72).

3.3 Produção de forragem e soja

A produção primária nas fases de pastagem e lavoura foi significativamente influenciada pela interação dos sistemas de produção e estratégias de adubação (Figura 4). Em consonância e em reflexo aos resultados obtidos para índices de qualidade do solo, o SIPA com adubação de sistema, obteve as maiores produções de forragem (Figura 4a, 11779 kg MS ha⁻¹) e soja (Figura 4b, 5083 kg ha⁻¹) quando comparado a área sem

pastejo com adubação de sistema (Forragem = 6920 kg MS ha⁻¹; Soja = 4288 kg ha⁻¹) e ao SIPA com adubação na lavoura (Forragem = 5780 kg MS ha⁻¹; Soja = 4382 kg ha⁻¹).

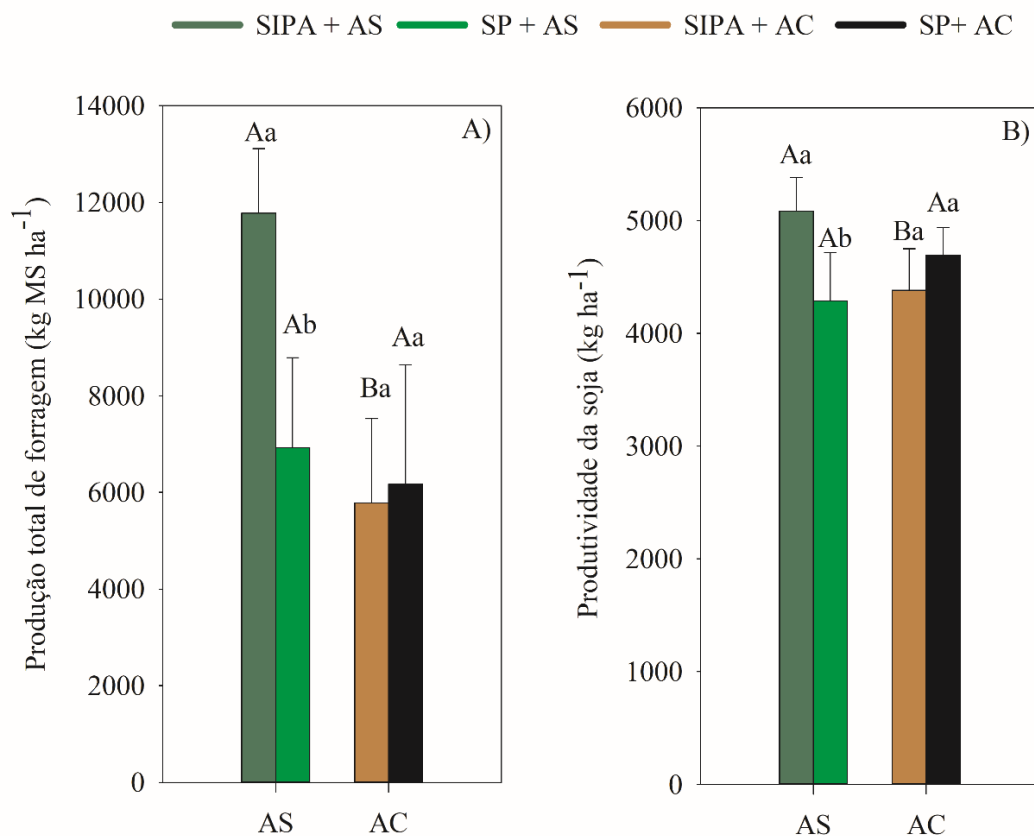


Figura 4. Produção total de forragem e produtividade da soja em sistema de integração lavoura-pecuária (SIPA) ou áreas sem pastejo (SP) com adubação de cultura (AC) ou sistema de adubação (AS). As letras maiúsculas comparam as estratégias de adubação em cada sistema de produção e letras minúsculas comparam diferentes sistemas de produção dentro de cada estratégia de adubação. As médias seguidas pelas mesmas letras não diferem pelo teste de Tukey em $P \leq 0,05$.

Esses resultados equivalem a acréscimos de 70% e 19% na produção total de forragem e soja, respectivamente, do SIPA com adubação de sistema em relação as áreas sem pastejo que também receberam adubação de sistema. Quando comparado as

produções do SIPA nas diferentes estratégias de adubação, a adubação de sistema promoveu incrementos na produção total de forragem e soja equivalentes 103% e 16%, respectivamente, comparado a adubação realizada na lavoura. As diferenças em percentual demonstraram que a presença da adubação nas pastagens, pode representar seguramente um fator de acréscimo ao crescimento e produção das espécies forrageiras submetidas ao pastejo.

3.4 Relações entre os índices de qualidade do solo e produção primária

A análise dos índices que representam as funções do solo ao longo do tempo e suas respectivas relações com a produção primária, independente do sistema de produção e estratégia de adubação (n=12), revelou correlações positivas entre as funções físico-hídricas do solo (Fii e Fiii) com a produtividade da soja durante a transição lavoura-pastagem (Tabela 6). Nesse momento, a capacidade do solo em infiltrar, armazenar e disponibilizar água e ar apresentou o maior coeficiente de correlação ($r=0,71$ e $p=0,01$) entre todas as funções com a produtividade da soja. Quando agrupado as funções físico-hídricas e bioquímicas no índice de qualidade do solo o coeficiente de correlação foi de $0,73$ ($p=0,01$) com o rendimento da soja durante o período de transição lavoura-pastagem. Esses resultados sugerem que ao final do ciclo da soja, principalmente, os atributos físico-hídricos do solo desempenham uma influência considerável na produção da soja, independente do sistema de produção e estratégia de adubação.

Durante a transição pastagem-lavoura, apesar de nenhuma das funções do solo ter demonstrado relação com o rendimento da soja, o índice de qualidade geral do solo correlacionou-se positivamente ($r=0,60$ e $p=0,04$) com a produção de grãos. Nesse sentido, reforçam-se a importância da definição de manejos que preconizem a manutenção da qualidade do solo durante a fase pastagem, com vistas aos possíveis

impactos benéficos na produção das lavouras. As médias dos índices que representam as funções em todos os períodos, em concordância com as relações observadas ao longo do tempo, revelaram apenas correlações entre as funções físicas do solo (Fii – $r=0,72$ e $p=0,01$; Fiii – $r=0,60$ e $p=0,04$) com a produtividade da soja. O índice de qualidade do solo médio de todos os períodos, independente dos sistemas de produção e estratégias de adubação, correlacionou-se ($r=0,72$ e $p=0,01$) com os maiores rendimentos da soja.

Tabela 5. Coeficientes de correlação de Pearson (r) e probabilidade de erro (p -valor) entre os índices das funções do solo (Fi, Fii e Fiii) e o índice de qualidade do solo (IQS), produção total de forragem (PTF) e produtividade de soja (PS).

Índices	P1		P2		P3		Média dos períodos		
	PTF	PS	PTF	PS	PTF	PS	PTF	PS	
Fi	r	0,38	0,31	0,18	0,04	0,45	0,56	0,48	0,37
	p-valor	0,23	0,33	0,57	0,91	0,14	0,06	0,12	0,24
Fii	r	0,49	0,71	0,62	0,32	0,62	0,54	0,65	0,72
	p-valor	0,11	0,01	0,03	0,30	0,04	0,08	0,02	0,01
Fiii	r	0,72	0,62	0,64	0,57	0,75	0,48	0,75	0,60
	p-valor	0,01	0,03	0,03	0,05	0,01	0,13	0,00	0,04
IQS	r	0,67	0,73	0,68	0,45	0,70	0,60	0,81	0,72
	p-valor	0,02	0,01	0,02	0,14	0,01	0,04	0,001	0,01
		AS		AC		SIPA		SP	
		PTF	PS	PTF	PS	PTF	PS	PTF	PS
Fi	r	0,89	0,91	0,88	-0,31	0,35	-0,04	0,61	0,48
	p-valor	0,02	0,01	0,02	0,56	0,50	0,94	0,20	0,34
Fii	r	0,74	0,84	0,22	0,42	0,83	0,69	0,16	0,70
	p-valor	0,10	0,04	0,67	0,41	0,04	0,13	0,76	0,12
Fiii	r	0,70	0,66	0,57	0,44	0,87	0,59	0,22	0,78
	p-valor	0,12	0,16	0,24	0,38	0,02	0,22	0,67	0,07
IQS	r	0,84	0,88	0,79	0,24	0,93	0,66	0,45	0,74
	p-valor	0,04	0,02	0,06	0,64	0,01	0,15	0,37	0,09

Manutenção da microbiota e ciclagem de nutrientes (Fi); Infiltração, armazenamento e disponibilidade de água e ar (Fii); Sustentar o crescimento das plantas e resistir à degradação (Fiii). Transição lavoura-pastagem (P1); Meio da fase pastagem (P2);

Transição pastagem-lavoura (P3). Integração lavoura-pecuária (SIPA); áreas sem pastejo (SP); adubação de cultura (AC) e sistema de adubação (AS).

A produtividade total de forragem demonstrou estar relacionada apenas com as funções físicas do solo em todos os períodos de avaliação (Tabela 6). Igualmente observado com o rendimento da soja, que independente dos sistemas de produção e das estratégias de adubação, não foram verificadas correlações significativas entre a função de manutenção da microbiota e ciclagem de nutrientes com a produção total de forragem. Embora, não tenha sido observado correlação independente entre a função bioquímica do solo e a produção total de forragem, a integração de todas as funções no índice de qualidade do solo resultou no maior coeficiente de correlação ($r=0,81$ e $p=0,001$) com a produção total de forragem.

Na adubação de sistema ($n=6$) a manutenção da microbiota e a ciclagem de nutrientes no solo demonstrou estar fortemente correlacionada com a produção total de forragem ($r=0,89$ e $p=0,02$) e o rendimento da soja ($r=0,91$ e $p=0,01$). Quando a adubação foi realizada na lavoura apenas foi verificada relação entre a atividade dos microrganismos com a produção total da forragem ($r=0,88$ e $p=0,02$). Apenas na adubação de sistema foram verificadas correlações significativas entre os índices de qualidade do solo e as produções de forragem ($r=0,84$ e $p=0,04$) e soja ($r=0,88$ e $p=0,02$).

A produção total de forragem em SIPA está fortemente correlacionada com as funções atribuídas as propriedades físico-hídricas do solo. No entanto, no SIPA a maior correlação da produção total de forragem resultou da integração de todas as funções bioquímicas e físicas no índice de qualidade do solo ($r=0,93$ e $p=0,01$). Não foram verificadas correlações significativas entre as funções e o índice de qualidade do solo para produção de forragem nas áreas sem pastejo.

4. Discussão

A integração do cultivo de plantas agrícolas e a produção animal é reconhecida como uma estratégia eficiente na utilização dos recursos naturais (Wright et al., 2011; Martins et al., 2014). No cenário atual, sob um contexto do aumento da pressão ambiental, esses sistemas tornaram-se importantes por contribuir na intensificação sustentável. As sinergias complexas e intrínsecas da relação solo-planta-animal oferecem um estado organizacional superior a esses agroecossistemas, capazes de alavancar diversos benefícios ambientais por meio de melhorias na qualidade do solo (de Faccio Carvalho et al., 2018). Os resultados do presente estudo demonstraram que o potencial desses sistemas pode ser aprimorado através do manejo da adubação. A aplicação do conceito de adubação de sistema em SIPA permitiu que as interações entre os componentes desse sistema fossem exploradas a partir de um contexto interdisciplinar, o que resultou não só na maior produção de alimentos, mas também na prestação de serviços ecossistêmicos.

Nesse contexto, é válido salientar que, embora esses sistemas sejam de fato uma alternativa eficiente para atender as novas exigências ambientais, as particularidades entre as interações criadas pela inserção de animais em pastejo exigem um nível maior de complexidade na compreensão do seu funcionamento. A partir de uma visão linear e parcial através do negligenciamento da pastagem e, conseqüentemente, da produção animal, ocorrem a neutralização dos efeitos benéficos dos animais em pastejo. Os resultados deste estudo revelaram que o SIPA quando não adubado na fase pastagem (P e K), reduz a produção primária e torna-se mais sensível aos impactos negativos dos animais na qualidade do solo. Além do P e do K, as práticas convencionais de adubação no sul do Brasil quando aplicadas nos SIPA negligenciam também a necessidade da adubação nitrogenada durante a fase pastagem, o que pode resultar em conseqüências ainda maiores para sustentabilidade desses sistemas.

No SIPA os animais em pastejo são responsáveis por conduzir mudanças nas propriedades funcionais do solo (Salton et al., 2014). A desfolha induz a emissão de novos perfilhos pelas plantas que, por sua vez, estimulam o crescimento radicular (Anghinoni et al., 2013). Simões et al., (2023) no mesmo experimento deste estudo verificaram que durante o meio da fase pastagem o azevém encontrava-se no máximo crescimento vegetativo. Dessa forma, considerando-se as proporções equivalentes de produção de biomassa aérea e subterrânea (Anghinoni et al., 2013) associadas aos estímulos do crescimento das raízes em SIPA, sugere-se que há uma relação direta entre esses processos e a variabilidade temporal verificada com os indicadores de qualidade do solo avaliados neste estudo.

O estímulo ao crescimento das raízes pode contribuir para redução da densidade do solo e, conseqüentemente, do grau de compactação através de um fenômeno conhecido como perfuração biológica (Cresswell e Kirkegaard, 1995). A perfuração biológica consiste na formação de bioporos no solo a partir da ação de organismos vivos, como bactérias e fungos, perfurando ou decompondo as raízes (Cresswell e Kirkegaard, 1995; Ghestem et al., 2011). O crescimento das raízes pode atuar também diretamente favorecendo benefícios na estrutura do solo através das pressões axiais e radiais exercidas durante a penetração no solo (Bodner et al., 2014).

Além disso, em áreas pastejadas ocorre o aumento da produção e liberação de exsudatos orgânicos pelas raízes (Petersen e Böttger, 1991, Huang et al., 2003) que, por sua vez, contribuem para aumentar a porosidade total atuando como agentes ligantes entre partículas minerais e microagregados (Pohl et al., 2009). Esses fenômenos associados explicam os resultados observados ao longo do tempo nas áreas de SIPA como a menor densidade do solo, o menor grau de compactação e maior porosidade total durante o meio da fase pastagem comparado a área sem pastejo. Todavia, essas mudanças estruturais

demonstraram-se ser de baixa persistência, não sendo detectadas ao final da pastagem quando o havia cessado o crescimento do azevém.

No SIPA com adubação de sistema, o rearranjo das partículas do solo provocado pelo estímulo da desfolha ao crescimento das raízes, favoreceu em 32% a subfunção do solo responsável pelo armazenamento e disponibilidade de água comparado a área sem pastejo. Além disso, as maiores entradas de resíduos orgânicos também estão associadas a esses resultados e explicam o incremento em 38% na capacidade do solo em sustentar o crescimento das plantas e resistir à degradação em relação aos sistemas de cultivo também adubados na fase pastagem. Bonetti et al. (2019) atribuíram a maior retenção de água em potenciais matriciais intermediários (entre -30 e -500 kPa) nos tratamentos com pastejo moderado ao maior acúmulo de matéria orgânica. Além disso, as novas rotas e fluxos de C oferecidos pelo animal atuam favorecendo a melhor agregação dos solos (Franzluebbers et al. 2011; Anghinoni et al., 2013).

Dessa forma, acredita-se que esses processos atuam simultaneamente sobre o conteúdo de água disponível para as plantas e na estabilidade estrutural dos solos em SIPA com adubação de sistema, o que reflete no acréscimo de 17% na capacidade do solo em sustentar o crescimento das plantas e resistência a degradação comparado a área sem pastejo na mesma estratégia de adubação. Essas implicações equivalem a redução de 14% para a área sem pastejo comparado ao SIPA no índice de qualidade do solo que integra as funções bioquímicas e físicas. No entanto, a ausência de adubação na fase pastagem reduziu o potencial de acúmulo de matéria orgânica e possivelmente impactou também no reajuste das partículas do solo, o que resultou na menor capacidade de água disponível para as plantas no SIPA comparado a área sem pastejo quando a adubação foi realizada na lavoura.

A ausência de adubação com P e K nas pastagens representa um limitante para produção total de forragem do azevém (Alves et al., 2022). Isso ocorre, principalmente, em solos intemperizados e ácidos onde o K é facilmente lixiviado, e os níveis de P geralmente são baixos, a produção vegetal depende fortemente da reposição constante desses fertilizantes (Luan et al., 2017). Apesar dos teores de P (30 mg dm^{-3}) e K (70 mg dm^{-3}) no solo deste estudo estarem acima do nível crítico (CQFS-RS/SC, 2016), a adubação nitrogenada em todos os tratamentos provoca o aumento na demanda de P e K pelas plantas de azevém (Lemaire et al., 2019), o que possivelmente implica em diferenças de absorção desses nutrientes quando há a reposição na pastagem comparado a ausência de reposição (adubação na lavoura). Alves et al. (2022) expuseram que a adubação de sistema com P e K aumenta os teores desses nutrientes na pastagem resultando em maior produção total de forragem.

Nesse contexto, devido ao contínuo estímulo ao crescimento e a absorção de nutrientes do solo provocados pela desfolha no SIPA (Gastal e Lemaire, 2015), a ausência da adubação com P e K nas pastagens pode seguramente representar um entrave ao acúmulo de biomassa aérea e subterrânea nesses sistemas. Essa limitação no aporte de matéria orgânica e no crescimento radicular representou neste estudo a neutralização dos impactos benéficos do pastejo no solo, reduzindo em 42% e 48% as subfunções de armazenamento e disponibilidade de água (ADA) e estabilidade estrutural do solo (ES), respectivamente. Essas consequências representaram a redução de 24% na capacidade de manutenção do crescimento das plantas e resistência a degradação no SIPA quando a adubação é realizada na lavoura. Ainda, o potencial desses solos em exercer as funções bioquímicas e físicas foi prejudicado em 13% comparado ao SIPA com adubação de sistema.

A capacidade de água disponível para as plantas e a capacidade de campo relativa estão relacionadas a poros de menor diâmetro no solo (Castellini et al., 2016), considerando também de forma associada os resultados obtidos para a macroporosidade e capacidade de aeração do solo (indicadores associados aos poros de maior diâmetro), sugere-se que houve um aumento de poros maiores e diminuição correspondente de poros menores na área sem pastejo a partir do meio da fase pastagem. Essa mudança no tamanho médio dos poros pode estar associada à maior condutividade hidráulica saturada encontrada nos sistemas de cultivo, independentemente do período de avaliação. Embora tenha ocorrido diferenças significativas entre os sistemas para os indicadores de densidade do solo, grau de compactação, porosidade total e condutividade hidráulica saturada, os valores observados com essas variáveis não representam riscos para o crescimento das plantas (Reichert et al., 2003; Reichert et al., 2009; Cherubin et al., 2016a; Reynolds et al., 2007; Reynolds et al., 2009).

A biomassa microbiana e a atividade enzimática no solo podem ser influenciadas pelo clima, principalmente, pela temperatura (Wallenstein et al. 2010) e pela umidade (Borowik et al., 2016), mas também pela disponibilidade de nutrientes e quantidade de carbono orgânico no solo (Souza et al., 2010). Durante a fase pastagem, principalmente, a partir do meio do ciclo vegetativo do azevém ocorreram as maiores produções de biomassa nos sistemas (Simões et al., 2023). Ainda, considerando a dinâmica de crescimento simultâneo entre a biomassa aérea e radicular, sugere-se que a partir do meio da fase pastagem ocorreram também maiores exsudações de formas altamente lábeis de carbono orgânico no solo (Chávez et al. 2011; Dhakal e Islam 2018). Essa maior entrada de material orgânico no sistema associada aos acréscimos de temperatura entre o início (média de 12°C) e o final da fase pastagem (média de 23°C) justificam os incrementos na

biomassa microbiana a partir do meio da fase pastagem e a maior atividade da β -glicosidase no período de transição pastagem-lavoura.

O enxofre (S) é um nutriente essencial ao crescimento das plantas devido à função estrutural em diversas moléculas como aminoácidos e proteínas (Scherer, 2001). Aproximadamente 90-98% do S do solo está na forma orgânica, sendo então o processo de mineralização de sulfatos orgânicos uma etapa fundamental para a disponibilidade de S no solo (Scherer, 2001; Chen et al., 2019). A arilsulfatase é a enzima responsável por catalisar a hidrólise de ésteres de sulfato orgânico e liberar íons de sulfato no solo (Tabatabai e Bremner, 1970). Portanto, a atividade dessa enzima pode representar a ciclagem e a disponibilidade do S para as plantas no solo. Embora o SIPA tenha apresentado maior ($p < 0,05$) atividade da arilsulfatase comparado a área sem pastejo, independente do período de avaliação e estratégia de adubação, essa diferença não comprometeu a disponibilidade de S para as plantas no sistema de produção exclusiva de grãos. De acordo com Lopes et al. (2013) os valores observados na área sem pastejo estão dentro dos limites considerados adequados para a atividade da arilsulfatase.

Os efeitos únicos do processo de pastejo promovem transformações quantitativas e qualitativas na matéria orgânica dos ecossistemas em que estão inseridos (Carvalho et al., 2010). As mudanças na qualidade dos compostos de carbono são provocadas diretamente pelo retorno de fezes e urina ao solo ou, indiretamente, por aumentos na concentração de nutrientes nos tecidos vegetais (Bardgett e Wardle, 2003). A quantidade de resíduos orgânicos é regulada por meio da indução de respostas fisiológicas nas plantas, como o estímulo ao crescimento e a exsudação radicular (Bardgett e Wardle, 2003). Os dejetos (fezes e urina) e os exsudatos radiculares são compostos de alta labilidade, com rápida decomposição, fornecendo energia e nutrientes aos microrganismos para mineralização da matéria orgânica e, finalmente, liberação de

nutrientes (Soussana e Lemaire, 2014). No SIPA essas alterações na dinâmica do carbono explicam a maior atividade da arilsulfatase comparado a área sem pastejo.

Os resultados do presente estudo revelaram que, independentemente do sistema de produção e da estratégia de adubação, as funções físico-hídricas do solo desempenham um papel fundamental na produção total de forragem e na produtividade da soja. Essas descobertas ainda destacaram que ao final do ciclo da soja a capacidade do solo em infiltrar, armazenar e disponibilizar água e ar (Fii) e o potencial desses solos em sustentar o crescimento das plantas e resistir à degradação (Fiii) exerce forte influência sobre a produção da lavoura.

A manutenção da microbiota e a ciclagem de nutrientes no solo expressou forte relação com a produção primária quando a adubação foi realizada na pastagem (adubação de sistema). Na adubação da lavoura esses atributos bioquímicos do solo exerceram apenas relação com a produção total de forragem. Essas descobertas sugerem que os microrganismos do solo exercem uma influência direta sobre a produção total de forragem nas duas estratégias de adubação. No entanto, a maior influência da microbiota e da ciclagem de nutrientes sobre a produção da soja ocorre, principalmente, quando a adubação é realizada na fase da pastagem. Além disso, a relação entre a microbiota e a ciclagem de nutrientes com a produção de forragem nos tratamentos adubados na lavoura, reforça a importância da participação desses processos como tentativa de manter a produção de forragem na ausência de adubação.

O índice de qualidade do solo que integra as funções relacionadas à bioquímica e à física do solo expôs relações significativas com a produção de forragem e soja na adubação de sistema. Portanto, a partir desses resultados, tornou-se evidente que a eficiência da adubação de sistema está fortemente relacionada com a participação dos atributos físico-hídricos e bioquímicos do solo. Todavia, não foi possível estabelecer

relações ($p > 0,05$) entre os índices de qualidade do solo e a produção primária quando a adubação foi realizada na lavoura. Os achados deste estudo sobre a importância das funções físico-hídricas do solo para produção de forragem em SIPA, corroboram com os resultados constatados por Simões et al. (2023). Esses autores também verificaram fortes relações entre a qualidade física dos solos com a produção vegetal em SIPA.

5. Conclusões

A adubação de sistema na integração agropecuária favorece as sinergias intrínsecas da relação solo-planta-animal, relacionadas ao aprimoramento do potencial produtivo desses sistemas. O manejo da adubação com P e K na pastagem da integração agropecuária ofereceu melhorias na qualidade do solo, o que resultou na maior produção de alimentos.

Por outro lado, a ausência de P e K na adubação da fase pastagem em sistemas integrados de produção agropecuária, reduz a produção primária e neutraliza os efeitos benéficos do pastejo na qualidade do solo. As práticas convencionais de adubação no sul do Brasil na integração agropecuária, negligenciam também a necessidade da adubação nitrogenada na fase pastagem, o que pode resultar em consequências negativas ainda mais graves para sustentabilidade desses sistemas. Por fim, as descobertas deste estudo evidenciaram que a eficiência da adubação de sistema em SIPA está fortemente relacionada com os atributos físico-hídricos e bioquímicos do solo.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos funcionários da fazenda da Estação Experimental de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, aos membros do Grupo de

Pesquisa em Ecologia do Pastejo (GPEP), Aliança SIPA e ao Grupo Interdisciplinar de Pesquisa em Biogeoquímica Ambiental (IRGEB).

Financiamento

O estudo foi financiado pela Fundação Agrisus – Projeto PA3010/20 e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001.

Referências

- Alves, L. A., Denardin, L. G. D. O., Farias, G. D., Flores, J. P. M., Filippi, D., Bremm, C., de Faccio Carvalho, P. C., Martins, A.P., Gatiboni, L. C., Tiecher, T., 2022. Fertilization strategies and liming in no-till integrated crop–livestock systems: effects on phosphorus and potassium use efficiency. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 46, e0210125. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210125>
- Ambus, J. V., Reichert, J. M., Gubiani, P. I., de Faccio Carvalho, P. C., 2018. Changes in composition and functional soil properties in long-term no-till integrated crop-livestock system. *Geoderma*, 330, 232-243. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.06.005>
- Anghinoni, I., de Faccio Carvalho, P.C., Costa, S.E.V.G. de A., 2013. Abordagem sistêmica do solo em Sistemas Integrados de Produção Agrícola e Pecuária no subtropical brasileiro. In: Araújo AP, Alves BJR, editors. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v. 8. p. 325-38.
- Bardgett, R.D., Wardle, D.A., 2003. Herbivore-mediated linkages between aboveground and belowground communities. *Ecology*, 84(9), 2258-2268. doi: 10.1890/02-0274

- Bodner, G., Leitner, D., Kaul, H. P., 2014. Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently. *Plant and Soil*, 380, 133-151. doi: 10.1007/s11104-014-2079-8
- Bonetti, J.A., Anghinoni, I., Gubiani, P.I., Cecagno, D., de Moraes, M.T., 2019. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. *Soil and Tillage Research*, 186, 280-291. doi:10.1016/j.still.2018.11.003
- Borowik, A., & Wyszowska, J., 2016. Soil moisture as a factor affecting the microbiological and biochemical activity of soil. *Plant, Soil and Environment*, 62(6), 250-255. doi: 10.17221/158/2016-PSE
- Brookes, P. C., Powlson, D. S., & Jenkinson, D. S., 1982. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil biology and biochemistry*, 14(4), 319-329. doi:10.1016/0038-0717(82)90001-3
- Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964. Hydraulic Properties of Porous Media and Their Relation to Drainage Design. *Transactions of the ASAE*, 7(1), 0026–0028. doi:10.13031/2013.40684
- Burdine, N.T., 1953. Relative Permeability Calculations From Pore Size Distribution Data. *Journal of Petroleum Technology*, 5(03), 71–78. doi:10.2118/225-g
- Castellini, M., Iovino, M., Pirastru, M., Niedda, M., Bagarello, V., 2016. Use of BEST procedure to assess soil physical quality in the Baratz Lake catchment (Sardinia, Italy). *Soil Science Society of America Journal*, 80(3), 742-755. doi: 10.2136/sssaj2015.11.0389
- Cecagno, D., de Andrade, S. E. V. G., Anghinoni, I., Kunrath, T. R., Martins, A. P., Reichert, J. M., Gubiani, P.I., Balerini, F., Fink, J.R., de Faccio Carvalho, P. C., 2016. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated

- crop-livestock system under different grazing intensities. *Soil and Tillage Research*, 156, 54-62. doi:10.1016/j.still.2015.10.005
- Chávez, L. F., Escobar, L. F., Anghinoni, I., Carvalho, P. C. D. F., Meurer, E. J., 2011. Metabolic diversity and microbial activity in the soil in an integrated crop-livestock system under grazing intensities. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46, 1254-1261. doi:10.1590/S0100-204X2011001000020
- Chen, H., Liu, J., Li, D., Xiao, K., Wang, K., 2019. Controls on soil arylsulfatase activity at a regional scale. *European Journal of Soil Biology*, 90, 9-14. doi:10.1016/j.ejsobi.2018.11.001
- Cherubin, M.R., Karlen, D.L., Cerri, C.E., Franco, A.L., Tormena, C.A., Davies, C.A., Cerri, C.C., 2016a. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PLoS One* 11 (3), e0150860. doi:10.1371/journal.pone.0150860
- Cherubin, M.R., Karlen, D.L., Franco, A.L., Tormena, C.A., Cerri, C.E., Davies, C.A., Cerri, C.C., 2016b. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma* 267, 156–168. doi:10.1016/j.geoderma.2016.01.004
- Commission of Chemistry and Soil Fertility (CQFS-RS/SC), 2016. Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Rio Grande do Sul, Brazil: SBCS-NRS/EMBRAPA-CNPT.
- Commission of Chemistry and Soil Fertility (CQFS-RS/SC), 2018. Manual de métodos de análises dos laboratórios da ROLAS RS/SC. Brazil: SBCS-NRS, p.76.
- Cresswell, H.P., Kirkegaard, J.A., 1995. Subsoil amelioration by plant-roots-the process and the evidence. *Soil Research*, 33(2), 221-239. doi:10.1071/SR9950221
- de Albuquerque Nunes, P. A., Laca, E. A., de Faccio Carvalho, P. C., Li, M., de Souza Filho, W., Robinson Kunrath, T., Martins, A.P., Gaudin, A., 2021. Livestock integration into soybean systems improves long-term system stability and profits

- without compromising crop yields. *Scientific reports*, 11(1), 1-14.
doi:10.1038/s41598-021-81270-z
- de Faccio Carvalho, P.C., 2013. Harry Stobbs Memorial Lecture: can grazing behavior support innovations in grassland management? *Trop Grasslands Forrajes Trop.* 1:137. doi: 10.17138/TGFT(1)137-155.
- de Faccio Carvalho, P.C., Peterson, C.A., Nunes, P.A.D.A., Martins, A.P., de Souza Filho, W., Bertolazi, V.T., Anghinoni, I., 2018. Animal production and soil characteristics from integrated crop-livestock systems: toward sustainable intensification. *Journal of animal science*, 96(8), 3513-3525. doi: 10.1093/jas/sky085
- Dhakar D., Islam M.A., 2018. Grass-legume mixtures for improved soil health in cultivated agroecosystem. *Sustainability* 10:2718. doi:10.3390/su10082718
- Dobermann, A., 2007. Nutrient use efficiency—measurement and management. In: Krauss, A., Isherwood, K., Heffer, P. (Eds.), *Fertilizer Best Management Practices: General Principles, Strategy for Their Adoption and Voluntary Initiatives Versus Regulations*. International Fertilizer Industry Association, Paris, France, pp. 1–28.
- Duru, M., Therond, O., Martin, G., Martin-Clouaire, R., Magne, M. A., Justes, E., Journet, E.P., Aubertot, J.N., Savary, S., Bergez, J.R., Sarthou, J. P., 2015. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agronomy for sustainable development*, 35, 1259-1281. doi: 10.1007/s13593-015-0306-1
- Eivazi, F., & Tabatabai, M. A., 1988. Glucosidases and galactosidases in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 20(5), 601-606. doi:10.1016/0038-0717(88)90141-1
- Farias, G.D., Dubeux, J.C.B., Savian, J.V., Duarte, L.P., Martins, A.P., Tiecher, T., Bremm, C., 2020. Integrated crop-livestock system with system fertilization approach improves food production and resource-use efficiency in agricultural lands. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(6), 1-9. doi:10.1007/s13593-

020-00643-2

- Franzluebbers, A.J., Stuedemann, J.A., Franklin, D.H., 2011. Water infiltration and surface-soil structural properties as influenced by animal traffic in the Southern Piedmont USA. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27: 256–265. doi:10.1017/S1742170511000378
- Fraser, M. D., Moorby, J. M., Vale, J. E., Evans, D. M., 2014. Mixed grazing systems benefit both upland biodiversity and livestock production. *PloS one*, 9(2), e89054. doi: 10.1371/journal.pone.0089054
- Garrett, R. D., Ryschawy, J., Bell, L. W., Cortner, O., Ferreira, J., Garik, A. V., Gil, J.D.B., Klerkx, L., Moraine, M., Peterson, C.A., Reis, J.C., Valentim, J. F., 2020. Drivers of decoupling and recoupling of crop and livestock systems at farm and territorial scales. *Ecology and Society*, 25(1), 24. . doi:10.5751/ES-11412-250124
- Gastal, F., Lemaire, G., 2015. Defoliation, shoot plasticity, sward structure and herbage utilization in pasture: Review of the underlying ecophysiological processes. *Agriculture*. 2015;5:1146-71. doi:10.3390/agriculture5041146
- Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., Tempio, G., 2013. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <http://www.fao.org/.../i3437e00.htm>
- Ghestem, M., Sidle, R. C., Stokes, A., 2011. The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability. *Bioscience*, 61(11), 869-879. doi: 10.1525/bio.2011.61.11.6
- Haverkamp, R., Ross, P.J., Smettem, K.R.J., Parlange, J.Y., 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research*, 30(11), 2931-2935. doi:10.1029/94WR01788

- Huang, Z., Haig, T., Wu, H., An, M., Pratley, J., 2003. Correlation between phytotoxicity on annual ryegrass (*Lolium rigidum*) and production dynamics of allelochemicals within root exudates of an allelopathic wheat. *Journal of chemical ecology*, 29(10), 2263-2279. doi: 10.1023/A:1026222414059
- Iovino, M., Castellini, M., Bagarello, V., Giordano, G., 2016. Using Static and Dynamic Indicators to Evaluate Soil Physical Quality in a Sicilian Area. *Land Degradation and Development*, 27(2), 200–210. doi:10.1002/ldr.2263.
- Islam, K. R., Weil, R. R., 1998. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. *Biology and Fertility of soils*, 27, 408-416. doi: 10.1007/s003740050451
- Lassabatère, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J.M., Cuenca, R., Braud, I., Haverkamp, R., 2006. Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments-BEST. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 521–532. doi:10.2136/sssaj2005.0026
- Lemaire, G., Sinclair, T., Sadras, V., Bélanger, G., 2019. Allometric approach to crop nutrition and implications for crop diagnosis and phenotyping. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 1-17. doi:10.1007/s13593-019-0570-6
- Lima, A. C. R., Brussaard, L., Totola, M. R., Hoogmoed, W. B., de Goede, R. G. M., 2013. A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. *Applied Soil Ecology*, 64, 194-200. doi:10.1016/j.apsoil.2012.12.009
- Lopes, A.A.C, Gomes de Sousa, D. M., Chaer, G. M., Bueno dos Reis Junior, F., Goedert, W. J., de Carvalho Mendes, I., 2013. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 77(2), 461-472. doi:10.2136/sssaj2012.0191

- Luan, M., Tang, R. J., Tang, Y., Tian, W., Hou, C., Zhao, F., Lan, W., Luan, S., 2017. Transport and homeostasis of potassium and phosphate: limiting factors for sustainable crop production. *Journal of experimental botany*, 68(12), 3091-3105. doi:10.1093/jxb/erw444
- MacDonald, J. M., McBride, W. D., 2009. The transformation of US livestock agriculture scale, efficiency, and risks. *Economic Information Bulletin*, 43,1-46. doi:10.2139/ssrn.1354028
- Marcolin, C. D., Klein, V. A., 2011. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 33, 349-354. doi:10.4025/actasciagron.v33i2.6120
- Martins, A. P., Cecagno, D., Borin, J. B. M., Arnuti, F., Lochmann, S. H., Anghinoni, I., Bissani, C.A., Bayer, C., de Faccio Carvalho, P. C., 2016. Long-, medium-and short-term dynamics of soil acidity in an integrated crop–livestock system under different grazing intensities. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 104, 67-77. doi: 10.1007/s10705-015-9759-5
- Martins, A. P., de Andrade Costa, S. E. V., Anghinoni, I., Kunrath, T. R., Balerini, F., Cecagno, D., de Faccio Carvalho, P. C., 2014. Soil acidification and basic cation use efficiency in an integrated no-till crop–livestock system under different grazing intensities. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 195, 18-28. doi: 10.1016/j.agee.2014.05.012
- Mendonça, E. de S.; Matos, E. da S., 2017. *Matéria Orgânica do Solo: Métodos de Análises*. 2^oed. [S. l.: s. n.], p.221.
- Moraes, A., de Faccio Carvalho, P.C., Anghinoni, I., Lustosa, S.B.C., de Andrade, S.E.V.G., Kunrath, T.R., 2014a. Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. *European Journal of Agronomy*, 57, 4-9. doi:10.1016/j.eja.2013.10.004

- Moraes, A.D., de Faccio Carvalho, P.C., Lustosa, S.B.C., Lang, C.R., Deiss, L., 2014b. Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, 45, 1024-1031. doi:10.1590/S1806-66902014000500018
- Mott, G.O., Lucas, H.L., 1952. The design, conduct, and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. In: Wagner R.E. et al., (eds) *Proceedings 6th International Grassland Congress*, Pennsylvania State College, PA, 17–23 August 1952, pp. 1380–1385. Hershey, PA, USA: Pennsylvania State College.
- Petersen, W., Böttger, M., 1991. Contribution of organic acids to the acidification of the rhizosphere of maize seedlings. *Plant and Soil*, 132(2), 159-163. doi:10.1007/BF00010396
- Peyraud, J. L., Taboada, M., Delaby, L., 2014. Integrated crop and livestock systems in Western Europe and South America: a review. *European Journal of Agronomy*, 57, 31-42. doi:10.1016/j.eja.2014.02.005
- Pires, G. C., de Oliveira Denardin, L. G., Silva, L. S., de Freitas, C. M., Gonçalves, E. C., de Camargo, T. A., Bremm, C., de Faccio Carvalho, P.C., de Souza, E. D., 2022. System Fertilization Increases Soybean Yield Through Soil Quality Improvements in Integrated Crop-Livestock System in Tropical Soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-9. doi:10.1007/s42729-022-01050-0
- Pohl, M., Alig, D., Körner, C., Rixen, C., 2009. Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems. *Plant and Soil*, 324, 91-102. doi: 10.1007/s11104-009-9906-3
- R Core Team, 2013. *R: a Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Available from: <http://www.R-project.org/>.
- Reichert, J.M., Reinert, D.J., Braidá, J.A., 2003. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência & Ambiente*, 27, 29-48.

- Reichert, J.M., Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.J., Horn, R., Håkansson, I., 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, 102(2), 242-254. doi:10.1016/j.still.2008.07.002
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., Yang, X.M., 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3–4), 252–263. doi:10.1016/j.geoderma.2009.06.009
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., Fox, C.A., Tan, C.S., Zhang, T.Q., 2007. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil and Tillage Research*, 96(1–2), 316–330. doi:10.1016/j.still.2007.07.003
- Salton, J. C., Mercante, F. M., Tomazi, M., Zanatta, J. A., Concenço, G., Silva, W. M., Retore, M., 2014. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 70-79. doi: 10.1016/j.agee.2013.09.023
- Scherer, H. W. , 2001. Sulphur in crop production. *European Journal of agronomy*, 14(2), 81-111. doi: 10.1016/S1161-0301(00)00082-4
- Simões, V. J. L. P., de Souza, E. S., Martins, A. P., Tiecher, T., Bremm, C., da Silva Ramos, J., Farias, G.D., de Faccio Carvalho, P. C., 2023. Structural soil quality and system fertilization efficiency in integrated crop-livestock system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 349, 108453. doi:10.1016/j.agee.2023.108453
- Soussana, J. F., Lemaire, G., 2014. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 9-17. doi: 10.1016/j.agee.2013.10.012

- Souza, E. D. D., Costa, S. E. V. G. D. A., Anghinoni, I., Lima, C. V. S. D., Carvalho, P. C. D. F., Martins, A. P., 2010. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, 34, 79-88. doi: 10.1590/S0100-06832010000100008
- Streck, E.V., Kämpf, N., Dalmolin, R.S.D., Klamt, E., Nascimento, P.C., Schneider, P., 2008. Solos do Rio Grande do Sul. EMATER/RS, Porto Alegre.
- Tabatabai, M. A., Bremner, J. M., 1970. Arylsulfatase activity of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 34(2), 225-229. doi: 10.2136/sssaj1970.03615995003400020016x
- Tedesco, M. J., Gianello, C., Bissani, C. A., Bohnen, H., & Volkweiss, S. J., 1995. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2^oed. Departamento de Solos, UFRGS, Porto Alegre, v.5, p.174.
- Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A.L, Teixeira, W.G., 2017. Manual de métodos de análise de solo EMBRAPA (Ed.), Embrapa Solos. Brasília, DF. p. 573.
- Topp, G.C., Reynolds, W.D., Cook, F.J., Kirby, J.M., Carter, M.R., 1997. Physical attributes of soil quality. In E. G. GREGORICH & M. . CARTER (Eds.), *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*. v.25. pp. 21–58. *Development in Soil Science*. doi:10.1016/S0166-2481(97)80029-3
- van Genuchten, M., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898. doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
- Walkley, A., Black, I. A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.

- Wallenstein, M., Allison, S. D., Ernakovich, J., Steinweg, J. M., Sinsabaugh, R., 2011. Controls on the Temperature Sensitivity of Soil Enzymes: A Key Driver of In Situ Enzyme Activity Rates. In: Shukla, G., Varma, A. (eds) Soil Enzymology. Soil Biology, vol 22. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-14225-3_13
- Wright, I. A., Tarawali, S., Blümmel, M., Gerard, B., Teufel, N., Herrero, M., 2012. Integrating crops and livestock in subtropical agricultural systems. Journal of the Science of Food and Agriculture, 92(5), 1010-1015. doi: 10.1002/jsfa.4556

CAPITULO IV

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A eficiência de uso de nutrientes com a adubação de sistema envolve fatores premeditados relacionados ao manejo, como o tipo de animal, a taxa de lotação e os níveis de nutrientes aplicados no pasto, assim como fatores de variação climática, como a umidade e temperatura. Além disso, as descobertas desta tese demonstraram de forma inédita a relação entre a dinâmica temporal dos processos físico-hídricos e bioquímicos do solo com a eficiência no uso de água e nutrientes em sistemas integrados de produção agropecuária sob adubação de sistema.

A partir das conexões entre os resultados observados nas sucessões pastagem-lavoura dos anos de 2020/2021 (Capítulo II) e 2021/2022 (Capítulo III), sugerimos que os benefícios da adubação de sistema com P e K em solos com teores desses nutrientes acima do nível crítico sejam variáveis de acordo com as condições ambientais. Embora, na sucessão pastagem-lavoura dos anos de 2020/2021, as produções primárias tenham sido incrementadas com essa estratégia de adubação. Não foram verificados efeitos significativos entre a interação da adubação de sistema e a integração agropecuária ou até mesmo efeitos isolados da estratégia de adubação na qualidade estrutural do solo. No entanto, durante a sucessão dos anos 2021/2022, demonstramos que a adubação de sistema na integração agropecuária favorece o aprimoramento do potencial produtivo desses sistemas. Nesse período (2021/2022), o manejo da adubação com P e K na pastagem da integração agropecuária ofereceu melhorias na qualidade do solo, o que resultou na maior produção de alimentos.

Essa minimização dos efeitos da adubação de sistema na integração agropecuária durante a sucessão pastagem-lavoura dos anos de 2020/2021, além dos fatores já discutidos no capítulo II, pode estar relacionada também as condições ambientais. Na sucessão pastagem-lavoura dos anos de 2020/2021 a precipitação pluvial acumulada correspondeu a 1443 mm, enquanto que entre 2021/2022 o acumulado foi de 828 mm, o que equivale a uma diferença considerável de 615 mm de chuva. Essa maior disponibilidade hídrica, possivelmente, atenuou os impactos da ausência da adubação com P e K nas pastagens (em solo com teores de P e K acima do nível crítico). Por outro lado, sob menor disponibilidade hídrica, a estratégia de adubação das pastagens na integração agropecuária demonstrou ser uma alternativa importante para manutenção do potencial produtivo dos sistemas e prestação de outros serviços ecossistêmicos. Assim, considerando o contexto das mudanças climáticas, torna-se essencial o desenvolvimento de mais estudos com natureza transdisciplinar sobre a estabilidade à variabilidade ambiental dos sistemas integrados de produção agropecuária submetidos a adubação de sistema.

REFERÊNCIAS

- AMBUS, J. V. *et al.* Changes in composition and functional soil properties in long-term no-till integrated crop-livestock system. **Geoderma**, Amsterdam, v. 330, p. 232-243, 2018.
- ANGHINONI, I. *et al.* O solo no contexto. *In*: MARTINS, A. P. *et al.* (ed.). **Integração soja-bovinos de corte no sul do Brasil**. Porto Alegre: Gráfica RJR, 2015. p. 53-74.
- ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 8, p. 221-278, 2013.
- ASSMANN, J. M. *et al.* Carbon and nitrogen cycling in an integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 50, p. 967-978, 2015.
- ASSMANN, T. S. *et al.* Adubação de sistemas e ciclagem de nutrientes em sistemas integrados de produção agropecuária. *In*: SOUZA, E. D. *et al.* (ed.). **Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil**. Tubarão: Copiart, 2018.
- ASSMANN, T. S.; SOARES, A. B.; LUIZ, A. Adubação de Sistemas em Integração Lavoura-Pecuária. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA, 1.; ENCONTRO DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA NO SUL DO BRASIL, Cascavel, 4., 2017, Cascavel. **Intensificação com sustentabilidade: [anais]**. Pato Branco: UTFPR, 2017. p. 67–84.
- ASSMANN, T. S. *et al.* Rendimento de milho em área de integração lavoura-pecuária sob o sistema de plantio direto, em presença e ausência de trevo branco, pastejo e nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, p. 675–683, 2003.
- AUERSWALD, K.; MAYER, F.; SCHNYDER, H. Coupling of spatial and temporal pattern of cattle excreta patches on a low intensity pasture. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 88, p. 275–288, 2009.
- BAILEY, D. W.; WELLING, G. R.; MILLER, E. T. Cattle use of foothills rangeland near dehydrated molasses supplement. **Journal of Range Management**, Denver, v. 54, n. 4, p. 338–347, 2001.
- BAIS, H. P. *et al.* The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 57, p. 233-266, 2006.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. *et al.* Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 1925-1933, 2009.

BALOTA, E. L. *et al.* Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, p. 641-649, 1998.

BARDGETT, Richard D.; WARDLE, David A. Herbivore-mediated linkages between aboveground and belowground communities. **Ecology**, Washington, DC, v. 84, n. 9, p. 2258-2268, 2003.

BELL, L. W.; MOORE, A. D. Integrated crop-livestock systems in Australian agriculture: trends, drivers and implications. **Agricultural Systems**, Barking, v. 111, p. 1-12, 2012.

BELL, L. W. *et al.* Impacts of soil damage by grazing livestock on crop productivity. **Soiland Tillage Research**, Amsterdam, v. 113, n. 1, p. 19-29, 2011.

BELL, L. W. *et al.* Evolution in crop – livestock integration systems that improve farm productivity and environmental performance in Australia. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 57, p. 10-20, 2014.

BONAUDO, T. *et al.* Agroecological principles for the redesign of integrated crop– livestock systems. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 57, p. 43-51, 2014.

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

BOROWIK, A.; WYSZKOWSKA, J. Soil moisture as a factor affecting the microbiological and biochemical activity of soil. **Plant, Soil and Environment**, Prague, v. 62, n. 6, p. 250-255, 2016.

BULLER, L. S. *et al.* Soil improvement and mitigation of greenhouse gas emissions for integrated crop–livestock systems: case study assessment in the Pantanal savanna highland, Brazil. **Agricultural Systems**, Barking, v. 137, p. 206-219, 2015.

CARMONA, F. C. *et al.* **Sistemas integrados de produção agropecuária em terrasbaixas: a integração lavoura-pecuária como o caminho da intensificação sustentável da lavoura arrozeira.** Porto Alegre: Editora RJR, 2018. 180 p.

CARVALHO, P. C. F. *et al.* Definições e terminologias para sistema integrado de produção agropecuária. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 5, p. 1040–1046, 2014.

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

- CARVALHO, P. C. F. *et al.* Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 88, p. 259-273, 2010.
- CATTELAN, A. J.; VIDOR, C. Flutuações na biomassa, atividade e população microbiana do solo, em função de variações ambientais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 14, p. 133-142, 1990.
- CECAGNO, D. *et al.* Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 156, p. 54-62, 2016.
- 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**, Brasília, DF, v. 46, p. 1254-1261, 2011.
- CONTE, O. *et al.* Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 10, p. 1301–1309, 2011.
- COSTA, S. E. V. G. A. *et al.* Impact of an integrated no-till crop-livestock system on phosphorus distribution, availability and stock. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 43-51, 2014.
- DE NEERGAARD, A. *et al.* Decomposition of white clover (*Trifolium repens*) and ryegrass (*Lolium perenne*) components: C and N dynamics simulated with the DAISY soil organic matter submodel. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 43-55, 2002.
- DURU, M. *et al.* How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 35, n. 4, p. 1259–1281, 2015.
- FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Building a common vision for sustainable food and agriculture: principles and approaches**. Rome: FAO, 2014.
- FRANK, D. A.; GROFFMAN, P. M. Ungulate versus landscape control of soil C and N processes in grasslands of Yellowstone National Park. **Ecology**, Washington, DC, v. 79, p. 2229–2241, 1998.
- FRANZLUEBBERS, A. J. *et al.* Agronomic and environmental impacts of pasture-croprotations in temperate North and South America. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 18-26, 2014.
- FRANZLUEBBERS, A. J. *et al.* Opportunities and challenges for integrating North-American crop and livestock systems. *In*: LEMAIRE, G. *et al.* (ed.). **Grassland productivity and ecosystem services**. Wallingford: CAB International, 2011b. p. 208-218.

FRANZLUEBBERS, A. J. *et al.* Water infiltration and surface- soil structural properties as influenced by animal traffic in the Southern Piedmont USA. **Renewable Agriculture and Food Systems**, Wallingford, v. 27, n. 4, p. 256-265, 2011a.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A. Soil physical responses to cattle grazing cover crops under conventional and no tillage in the Southern Piedmont USA. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 100, n. 1/2, p. 141-153, 2008.

FRANZLUEBBERS, A. J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 66, p. 197–205, 2002.

FRASER, M. D. *et al.* Mixed grazing systems benefit both upland biodiversity and livestock production. **PloS One**, San Francisco, v. 9, n. 2, [art.] e89054, 2014.

GALETTO, S. L. *et al.* Grain crops and forage yield resulting from the use of phosphates in integrated production system. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, p. 931-945, 2014.

GODFRAY, H. C. J. *et al.* Food security: the challenge of feeding 9 billion people. **Science**, Washington, DC, v. 327, n. 5967, p. 812-818, 2010.

GYSSSELS, G. *et al.* Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. **Progress in Physical Geography**, London, v. 29, n. 2, p. 189-217, 2005.

HAMILTON, E. W. III. *et al.* Defoliation induces root exudation and triggers positive rhizospheric feedbacks in a temperate grassland. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 40, n. 11, p. 2865-2873, 2008

HAMILTON, E. W. III.; FRANK, D. A. Can plants stimulate soil microbes and their own nutrient supply? Evidence from a grazing tolerant grass. **Ecology**, Washington, DC, v. 82, n. 9, p. 2397-2402, 2001.

HILBERT, D. W. *et al.* Relative growth rates and the grazing optimization hypothesis. **Oecologia**, Berlin, v. 51, p. 14–18, 1981.

HOUSE, G. J.; BRUST, G. E. Ecology of low-input, no-tillage agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 27, n. 1/4, p. 331-345, 1989.

HU, J. *et al.* Decomposition characteristics of organic materials and their effects on labile and recalcitrant organic carbon fractions in a semi-arid soil under plastic mulch and drip irrigation. **Journal of Arid Land**, Beijing, v. 10, n. 1, p. 115-128, 2018.

JIN, K. *et al.* How do roots elongate in a structured soil? **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 64, n. 15, p. 4761-4777, 2013.

KAYE, J. P.; HART, S. C. Competition for nitrogen between plants and soil microorganisms. **Trends in Ecology and Evolution**, Amsterdam, v. 12, p.139-143, 1997.

KIRSCHENMANN, F. Reconsidering grass: sustainable new farm designs. *In*: FRANZLUEBBERS, A. J. (ed.). **Farming with grass: achieving sustainable mixed agricultural landscapes**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 2009. p. 1- 11.

KIRSCHENMANN, F. L. Potential for a new generation of biodiversity in agroecosystems of the future. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 2, p. 373-376, 2007.

KLUTHCOUSK, J.; STONE, L. F. Manejo sustentável dos solos dos Cerrados. *In*: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. (ed.). **Integração lavoura-pecuária**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa, 2003. p. 59-104.

LEMAIRE, G. *et al.* Grassland-cropping rotations: an avenue for agricultural diversification to reconcile high production with environmental quality. **Environmental Management**, New York, v. 56, p.1065-1077, 2015.

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

LIEBIG, M. A. *et al.* Soil hydrological attributes of an Integrated Crop-Livestock Agroecosystem: increased adaptation through resistance to soil change. **Applied and Environmental Soil Science**, New York, v. 2011, [art.] ID 464827, [p. 1–6], 2011.

LINHARES, M. Y. L. Região e história agrária. **Revista Estudos Históricos**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 15, p. 17-26, 1995.

MARTINS, A. P. *et al.* (ed.). **Integração soja-bovinos de corte no sul do Brasil**. Porto Alegre: Gráfica RJR, 2015. 104 p.

MARTINS, A. P. *et al.* Long-, medium-and short-term dynamics of soil acidity in an integrated crop–livestock system under different grazing intensities. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 104, p. 67-77, 2016.

MARTINS, A. P. *et al.* Soil acidification and basic cation use efficiency in an integratedno-till crop–livestock system under different grazing intensities. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 195, p. 18-28, 2014.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea**. São Paulo: Editora Unesp, 2010. 568 p.

MEDEIROS, R. B. Considerações sobre a integração lavoura-pecuária no Rio Grandedo Sul. *In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DA PASTAGEM*, 5., 1978, Piracicaba. [Anais...]. Piracicaba: ESALQ, 1978. p. 235–301.

MORAES, A. *et al.* Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 57, p. 4-9, 2014a.

MORAES, A. *et al.* Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, p. 1024-1031, 2014b.

MORAES, A. *et al.* Sistemas de integração lavourapecuária. *In: REIS, R. A. et al. (ed.). Forragicultura: ciência, tecnologia e gestão dos recursos forrageiros*. Jaboticabal: Gráfica Multipress, 2014c. p. 203-218.

MOREIRA, W. H. *et al.* Influência da altura de pastejo de azevém e aveia em atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico, após sete anos sob integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, p. 1315–1326, 2014.

OESTERHELD, M.; MCNAUGHTON, S. J. Interactive effect of flooding and grazing on the growth of Serengeti grasses. **Oecologia**, Berlin, v. 88, p. 153–156, 1991.

OLIVEIRA, C. A. O. *et al.* Comparison of an integrated crop-livestock system with soybean only: economic and production responses in southern Brazil. **Renewable Agriculture and Food Systems**, Wallingford, v. 29, p. 230-238, 2014.

PEYRAUD, J. L. *et al.* Integrated crop and livestock systems in Western Europe and South America: a review. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 57, p. 31-42, 2014.

POHL, M. *et al.* Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems. **Plant and Soil**, The Hague, v. 324, p. 91-102, 2009.

RAWLS, W. J. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, p. 61–76, 2003.

RYSCHAWY, J. *et al.* Mixed crop-livestock systems: an economic and environmental-friendly way of farming? **Animal**, Cambridge, v. 6, p. 1722-1730, 2012.

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

SALTON, J. C. *et al.* Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 11–21, 2008.

SANDINI, I. E. *et al.* Efeito residual do nitrogênio na cultura do milho no sistema de produção integração lavoura-pecuária. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, p. 1315–1322, 2011.

SARTOR, L. R. *et al.* Avaliação do estado nutricional da pastagem: índice nutricional de nitrogênio. **Semina**, Londrina, v. 35, n. 1, p. 449-456, 2014.

SHARIFF, A. R. *et al.* Grazing intensity effects on litter decomposition and soil nitrogen mineralization. **Journal of Range Management**, Denver, v. 47, p. 444– 449, 1994.

SILVA, F. D. *et al.* Pasture grazing intensity and presence or absence of cattle dung input and its relationships to soybean nutrition and yield in integrated crop–livestock systems under no-till. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 57, p. 84-91, 2014b.

SILVA, H. A. *et al.* Chemical and physical soil attributes in integrated crop-livestock system under no-tillage. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, p. 946-944, 2014a.

SOARES, André Brugnara *et al.* Produção animal e vegetal em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária. *In*: SIMPÓSIO DE PRODUÇÃO ANIMAL A PASTO, 3., 2015, Dois Vizinhos, PR. [Anais...]. Dois Vizinhos: UTFPR, UEM, 2015. p. 139.

SOUSSANA, J.-F.; LEMAIRE, G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 9–17, 2014.

SOUZA, E. D. *et al.* Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, p. 74-88, 2010.

SOUZA, E. D. *et al.* Alterações nas frações do carbono em um Neossolo quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.28,p. 305-311, 2006b.

SOUZA, E. D. *et al.* Frações do carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana em um Latossolo Vermelho sob Cerrado submetido a diferentes sistemas de manejo e usos do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 28, p. 323-329, 2006a.

SPERA, S. T. *et al.* Efeito de sistemas de integração lavoura-pecuária sob plantio direto em alguns atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 7, p. 388-393, 2012.

STEINER, J. L. *et al.* Expanding horizons of farming with grass. *In*: FRANZLUEBBERS, A. J. (ed.). **Farming with grass: achieving sustainable**

mixed agricultural landscapes. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 2009. p. 216-234.

SUBBARAO, G. V. *et al.* Biological nitrification inhibition (BNI) activity in sorghum and its characterization. **Plant and Soil**, The Hague, v. 366, p. 243-259, 2013.

TABOADA, M. A.; RUBIO, G.; CHANETON, E. J. Grazing impacts on soil physical, chemical, and ecological properties in forage production systems. *In*: HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J. (ed.). **Soil management: building a stable base for agriculture**. Madison: ASA, SSSA, 2011. cap. 20, p. 301-320.

TATE, K. W. *et al.* Spatial and temporal patterns of cattle feces deposition on rangeland. **Journal of Range Management**, Denver, v. 56, p. 432-438, 2003.

TILMAN, D. *et al.* Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 108, n. 50, p. 20260-20264, 2011.

WAKELIN, S. A. *et al.* Pasture management clearly affects soil microbial community structure and N-cycling bacteria. **Pedobiologia**, Jena, v. 52, p. 237-251, 2009.

WALLENSTEIN, M. *et al.* Controls on the temperature sensitivity of soil enzymes: a key driver of in situ enzyme activity rates. *In*: SHUKLA, G.; VARMA, A. (ed.). **Soil enzymology**. Heidelberg: Springer, 2010. p. 245-258.

WHITE, S. L. *et al.* Spatial and time distribution of dairy cattle excreta in an intensive pasture systems. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 30, n. 6, p. 2180-2187, 2001.

WOHLENBERG, E. V. *et al.* Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 891-900, 2004.

WRIGHT, I. A. *et al.* Integrating crops and livestock in subtropical agricultural systems. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 92, p. 1010-1015, 2011.

YU, Pujia *et al.* Soil organic carbon fractions are affected by different land uses in an agro-pastoral transitional zone in Northeastern China. **Ecological Indicators**, New York, v. 73, p. 331-337, 2017.

ZÚÑIGA, F. *et al.* Temporal dynamics of the physical quality of an Andisol under a grazing system subjected to different pasture improvement strategies. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 145, p. 233-241, 2015.

APÊNDICE

Apêndice 1. Scientific article published in Agriculture Ecosystem & Environment.

For complete version access <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108453>



Contents lists available at ScienceDirect

Agriculture, Ecosystems and Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/agee



Structural soil quality and system fertilization efficiency in integrated crop-livestock system

Vicente José Laamon Pinto Simões^{a,*}, Eduardo Soares de Souza^c, Amanda Posselt Martins^b, Tales Tiecher^d, Carolina Bremm^a, Jenifer da Silva Ramos^a, Gustavo Duarte Farias^a, Paulo César de Faccio Carvalho^a

^a Department of Forage Plants and Agronomy, Integrated Crop-Livestock System Research Group (GPSIPA), Federal University of Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 7712, Porto Alegre, RS 91540-000, Brazil

^b Department of Soil Science, Interdisciplinary Research Group on Environmental Biogeochemistry (IRGER), Federal University of Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves, Av. Bento Gonçalves 7712, Porto Alegre, RS 91540-000, Brazil

^c Postgraduate Program in Plant Production, Federal Rural University of Pernambuco/Academic Unit of Serra Talhada, PE, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:

Mixed systems
Soil physical functions
Soil quality
Fertilization
Grazing

ABSTRACT

The nutrient use efficiency in integrated crop-livestock systems under system fertilization may be related to soil structural variations caused by grazing. These hypothetical cause-effect relationships are not known, which reflects a limited understanding of the underlying processes. This study evaluated the association between soil structural quality and system fertilization efficiency of phosphorus and potassium in an integrated crop-livestock system and a pure crop system. The treatments were two fertilization strategies (system fertilization and crop fertilization) in a factorial scheme with two production systems (an integrated crop-livestock system and a pure crop system) distributed in a randomized block design with four replicates. In the pure crop system, soybean was grown followed by Italian ryegrass as a non-grazed cover crop. In the integrated crop-livestock system, the ryegrass was grazed by sheep. In the crop fertilization strategy, phosphorus and potassium were applied at the soybean planting, and nitrogen in the ryegrass establishment. In the system fertilization strategy, nitrogen, phosphorus, and potassium were applied during the establishment of ryegrass. Soil physical quality indices were calculated for the beginning, middle, and end of the pasture phase (2020) and at the soybean harvest (2021). Forage and soybean production were also evaluated. Based on the soil physical quality index, the soil's ability to perform its physical functions decreased from 94% under an integrated crop-livestock system to 89% under a pure crop system. The results indicated higher total forage production (36%) and soybean yield (13%) in the system fertilization strategy as compared to the crop fertilization strategy. Moreover, the integrated crop-livestock system produced more forage (31%) and soybean grains (15%) than the pure crop system. The study provides the first evidence that higher structural quality of soils in an integrated crop-livestock system favors crop yields at all stages of production. However, the nutrient use efficiency in system fertilization is only partially explained by the soil's physical quality.

1. Introduction

The population expansion associated with higher per capita incomes will require double the current food production by the middle of this century (FAO, 2014; Mottet et al., 2017). This scenario historically represents one of the biggest challenges for the agricultural sector, since this increase will have to be achieved without expanding new areas and with minimal environmental impact (Morales et al., 2014a). In modern

agriculture, the food sector chose to become more specialized and simplified production systems by disconnecting plant and animal production (de Faccio Carvalho et al., 2014). However, the specialization of activities resulted in greater dependence on external inputs (eg, pesticides and fertilizers) and, at the same time, reduced the use of management inputs (e.g., biological control, nutrient cycling and carbon accumulation) (House and Brust, 1989), resulting in harmful impacts on the environment.

* Correspondence to: Av. Bento Gonçalves 7712, Porto Alegre, RS ZIP Code 91540-000, Brazil.
E-mail address: laamoneng_agro@gmail.com (V.J.L.P. Simões).

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108453>

Received 5 December 2022; Received in revised form 26 February 2023; Accepted 1 March 2023

Available online 11 March 2023

0167-8809/© 2023 Elsevier B.V. All rights reserved.

Apêndice 2. Normas para elaboração e submissão de trabalhos científicos à revista Science of the Total Environment



SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT

An International Journal for Scientific Research into the Environment and its Relationship with Humankind

AUTHOR INFORMATION PACK

TABLE OF CONTENTS

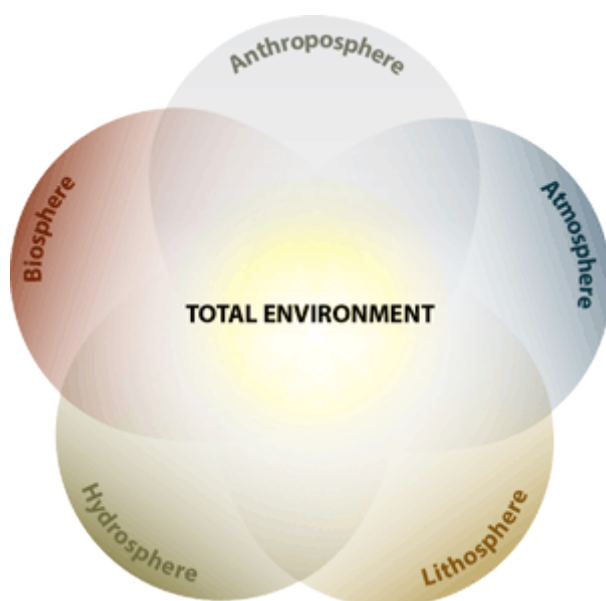
•	Description	p.1
•	Audience	p.2
•	Impact Factor	p.2
•	Abstracting and Indexing	p.2
•	Editorial Board	p.3
•	Guide for Authors	p.16



ISSN: 0048-9697

Aims and Scope

Science of the Total Environment is an international multi-disciplinary natural science journal for publication of novel, hypothesis-driven and high-impact research on the **total environment**, which interfaces the **atmosphere**, **lithosphere**, **hydrosphere**, **biosphere**, and **anthroposphere**.



STOTEN invites contributions of original and high quality interdisciplinary environmental research papers of broad impact. Studies significantly advancing fundamental understanding and that focus on the interconnection of multiple spheres will be given primary consideration. Field studies have preference, while papers describing laboratory experiments must demonstrate significant advances in methodology or mechanistic understanding with a clear connection to the environment. Descriptive, repetitive, incremental or regional-scale studies with limited novelty will not be considered.

1) Subject areas may include, but are not limited to:

- Air quality, atmospheric conditions, and new understanding of their role in adverse health or

environmental outcomes

- Atmospheric biogeochemistry
 - Ecosystem services and life cycle assessment
 - Ecotoxicology and risk assessment
 - Eco-hydrology
 - Wildlife and contaminants
 - Environmental impacts of climate change, agriculture, forestry, and land uses
 - Environmental impacts of waste or wastewater treatment
 - Drinking water contaminants and health implication
 - Environmental remediation of soil and groundwater
 - Global change-induced extreme events and environmental impacts
 - Groundwater hydrogeochemistry and modeling
 - Nanomaterials, microplastics, and other emerging contaminants
 - Novel contaminant (bio)monitoring and risk assessment approaches
 - Remote sensing and big data applications in multiple spheres
 - Stress ecology in marine, freshwater, and terrestrial ecosystems
 - Trace metals and organics in biogeochemical cycles
 - Water quality and security
- Critical reviews or Discussion on current or emerging topics
- Fast-track submissions (less than 2 weeks): Ground-breaking discoveries with immediate impact

2) **TYPES OF SUBMISSIONS NOT TO BE CONSIDERED:**

- Papers not contributing significant new knowledge to the field of study
- Treatment/technology/engineering studies that do not demonstrate direct environmental effects or benefits
- Disciplinary studies with limited environmental relevance
- Local or regional scale case studies lacking international relevance
- Soil or plant science studies without environmental implications
- Laboratory batch experiments without an application component, e.g., batch sorption experiments, preparation, and evaluation of sorbents or catalysts for contaminant removal, or controlled laboratory experiments not using environmentally relevant concentrations
- Manuscripts that are primarily data reports without a substantial hypothesis, e.g., monitoring of common contaminants
- Modelling studies without calibration and data validation
- Papers of social science in nature on economics, sociology, psychology, political science, policy, planning and/or management
- Toxicology and ecotoxicology studies testing single chemicals in bench-scale assays
- Human health studies that do not provide significant additional understanding of air pollution induced health outcomes
- Papers covering exposures, health effects, and control measures in occupational settings
- Method development papers on common contaminants
- Bibliometric analysis-based papers
- Papers that describe data analysis methods including machine learning that do not provide new scientific insights into the system from which the data were collected.

Please DO NOT ask the Editors-in-Chief for permission before submitting a manuscript. Kindly check the guidelines to determine whether your manuscript is within the scope of the journal; if yes, please go ahead and submit it.

Important information regarding plagiarism, self-plagiarism, and multiple submission can be found [here](#).

Types of article

Research papers reporting original and previously unpublished work.

Short Communications. A brief communication of urgent matter or the reporting of preliminary findings.

Letters to the Editor. A written discussion of papers published in the journal. Letters are accepted on the basis of new scientific insights on the particular topic, critical additional information, relevance to the published paper and timeliness. Authors will be invited to submit a **Reply** to respond to points raised. The Editor will decide on the publication of Letters and Replies based on scientific merit, importance to the raised issues, and interest to the general audience. Letters and Replies of an unprofessional or unscientific nature, or containing personal invective, will not be considered.

Review Articles. Critical evaluation of existing data, defined topics or emerging fields of investigation, critical issues of public concern.

Discussion. Opinionated exposition on an important scientific issue or event designed to stimulate further discussion in a broader scientific forum.

Special Issues. Proceedings of symposia, workshops and/or conferences will be considered for publication as a special issue. The Special Issue Editor, Dr. Paola Verlicchi (verlicchi.elsevier@gmail.com), should be contacted early in the conference planning process to get approval. For guidelines and full information on special issues of this journal please click [here](#).

Submission checklist

You can use this list to carry out a final check of your submission before you send it to the journal for review. Please check the relevant section in this Guide for Authors for more details.

Ensure that the following items are present:

Only one author is designated as the corresponding author with contact details:

- E-mail address
- Full postal address

All necessary files have been uploaded:

Manuscript:

- Include keywords
- All figures (include relevant captions)
- All tables (including titles, description, footnotes)
- Ensure all figure and table citations in the text match the files provided
- Indicate clearly if color should be used for any figures in print

Graphical Abstracts / Highlights files (convey the main message of described study)

Supplemental files (must have the same title page as the main paper)

Further considerations

- Manuscript has been 'spell checked' and 'grammar checked'
- All references mentioned in the Reference List are cited in the text, and vice versa
- Limit the total number of figures and tables to no more than 8, place secondary figures and tables, pictorial figures, and over-sized tables in Supplementary Material
- Permission has been obtained for use of copyrighted material from other sources (including the Internet)
- A competing interests statement is provided, even if the authors have no competing interests to declare
- Journal policies detailed in this guide have been reviewed
- Suggested reviewers should be from diverse regions, with contact details

For further information, visit our [Support Center](#)



Before You Begin

Ethics in publishing

Please see our information on [Ethics in publishing](#).

Studies in humans and animals

If the work involves the use of human subjects, the author should ensure that the work described has been carried out in accordance with [The Code of Ethics of the World Medical Association](#) (Declaration of Helsinki) for experiments involving humans. The manuscript should be in line with the [Recommendations for the Conduct, Reporting, Editing and Publication of Scholarly Work in Medical Journals](#) and aim for the inclusion of representative human populations (sex, age and ethnicity) as per those recommendations. The terms [sex and gender](#) should be used correctly.

Authors should include a statement in the manuscript that informed consent was obtained for experimentation with human subjects. The privacy rights of human subjects must always be observed.

All animal experiments should comply with the [ARRIVE guidelines](#) and should be carried out in accordance with the U.K. Animals (Scientific Procedures) Act, 1986 and associated guidelines, [EU Directive 2010/63/EU for animal experiments](#), or the National Research Council's [Guide for the Care and Use of Laboratory Animals](#) and the authors should clearly indicate in the manuscript that such guidelines have been followed. The sex of animals must be indicated, and where appropriate, the influence (or association) of sex on the results of the study.

Declaration of competing interest

Corresponding authors, on behalf of all the authors of a submission, must disclose any financial and personal relationships with other people or organizations that could inappropriately influence (bias) their work. Examples of potential conflicts of interest include employment, consultancies, stock ownership, honoraria, paid expert testimony, patent applications/registrations, and grants or other funding. All authors, including those *without* competing interests to declare, should provide the relevant information to the corresponding author (which, where relevant, may specify they have nothing to declare). Corresponding authors should then use [this tool](#) to create a shared statement and upload to the submission system at the Attach Files step. **Please do not convert the .docx template to another file type. Author signatures are not required.**

Declaration of generative AI in scientific writing

The below guidance only refers to the writing process, and not to the use of AI tools to analyse and draw insights from data as part of the research process.

Where authors use generative artificial intelligence (AI) and AI-assisted technologies in the writing process, authors should only use these technologies to improve readability and language. Applying the technology should be done with human oversight and control, and authors should carefully review and edit the result, as AI can generate authoritative-sounding output that can be incorrect, incomplete or biased. AI and AI-assisted technologies should not be listed as an author or co-author, or be cited as an author. Authorship implies responsibilities and tasks that can only be attributed to and performed by humans, as outlined in Elsevier's [AI policy for authors](#).

Authors should disclose in their manuscript the use of AI and AI-assisted technologies in the writing process by following the instructions below. A statement will appear in the published work. Please note that authors are ultimately responsible and accountable for the contents of the work.

Disclosure instructions

Authors must disclose the use of generative AI and AI-assisted technologies in the writing process by adding a statement at the end of their manuscript in the core manuscript file, before the References list. The statement should be placed in a new section entitled 'Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process'.

Statement: During the preparation of this work the author(s) used [NAME TOOL / SERVICE] in order to [REASON]. After using this tool/service, the author(s) reviewed and edited the content as needed and take(s) full responsibility for the content of the publication.

This declaration does not apply to the use of basic tools for checking grammar, spelling, references etc. If there is nothing to disclose, there is no need to add a statement.

Submission declaration and verification

Submission of an article implies that the work described has not been published previously (except in the form of an abstract, a published lecture or academic thesis, see '[Multiple, redundant or concurrent publication](#)' for more information), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. To verify compliance, your article may be checked by [Crossref Similarity Check](#) and other originality or duplicate checking software.

Preprints

Please note that [preprints](#) can be shared anywhere at any time, in line with Elsevier's [sharing policy](#). Sharing your preprints e.g. on a preprint server will not count as prior publication (see '[Multiple, redundant or concurrent publication](#)' for more information).

Preprint posting on SSRN

In support of [Open Science](#), this journal offers its authors a free preprint posting service. Preprints provide early registration and dissemination of your research, which facilitates early citations and collaboration.

During submission to Editorial Manager, you can choose to release your manuscript publicly as a preprint on the preprint server [SSRN](#) once it enters peer-review with the journal. Your choice will have no effect on the editorial process or outcome with the journal. Please note that the corresponding author is expected to seek approval from all co-authors before agreeing to release the manuscript publicly on SSRN.

You will be notified via email when your preprint is posted online and a Digital Object Identifier (DOI) is assigned. Your preprint will remain globally available free to read whether the journal accepts or rejects your manuscript.

For more information about posting to [SSRN](#), please consult the [SSRN Terms of Use](#) and [FAQs](#).

Use of inclusive language

Inclusive language acknowledges diversity, conveys respect to all people, is sensitive to differences, and promotes equal opportunities. Content should make no assumptions about the beliefs or commitments of any reader; contain nothing which might imply that one individual is superior to another on the grounds of age, gender, race, ethnicity, culture, sexual orientation, disability or health condition; and use inclusive language throughout. Authors should ensure that writing is free from bias, stereotypes, slang, reference to dominant culture and/or cultural assumptions. We advise to seek gender neutrality by using plural nouns ("clinicians, patients/clients") as default/wherever possible to avoid using "he, she," or "he/she." We recommend avoiding the use of descriptors that refer to personal attributes such as age, gender, race, ethnicity, culture, sexual orientation, disability or health condition unless they are relevant and valid. When coding terminology is used, we recommend to avoid offensive or exclusionary terms such as "master", "slave", "blacklist" and "whitelist". We suggest using alternatives that are more appropriate and (self-) explanatory such as "primary", "secondary",

"blocklist" and "allowlist". These guidelines are meant as a point of reference to help identify appropriate language but are by no means exhaustive or definitive.

Reporting sex- and gender-based analyses

Reporting guidance

For research involving or pertaining to humans, animals or eukaryotic cells, investigators should integrate sex and gender-based analyses (SGBA) into their research design according to funder/sponsor requirements and best practices within a field. Authors should address the sex and/or gender dimensions of their research in their article. In cases where they cannot, they should discuss this as a limitation to their research's generalizability. Importantly, authors should explicitly state what definitions of sex and/or gender they are applying to enhance the precision, rigor and reproducibility of their research and to avoid ambiguity or conflation of terms and the constructs to which they refer (see Definitions section below). Authors can refer to the [Sex and Gender Equity in Research \(SAGER\) guidelines](#) and the [SAGER guidelines checklist](#). These offer systematic approaches to the use and editorial review of sex and gender information in study design, data analysis, outcome reporting and research interpretation - however, please note there is no single, universally agreed-upon set of guidelines for defining sex and gender.

Definitions

Sex generally refers to a set of biological attributes that are associated with physical and physiological features (e.g., chromosomal genotype, hormonal levels, internal and external anatomy). A binary sex categorization (male/female) is usually designated at birth ("sex assigned at birth"), most often based solely on the visible external anatomy of a newborn. Gender generally refers to socially constructed roles, behaviors, and identities of women, men and gender-diverse people that occur in a historical and cultural context and may vary across societies and over time. Gender influences how people view themselves and each other, how they behave and interact and how power is distributed in society. Sex and gender are often incorrectly portrayed as binary (female/male or woman/man) and unchanging whereas these constructs actually exist along a spectrum and include additional sex categorizations and gender identities such as people who are intersex/have differences of sex development (DSD) or identify as non-binary. Moreover, the terms "sex" and "gender" can be ambiguous—thus it is important for authors to define the manner in which they are used. In addition to this definition guidance and the SAGER guidelines, the [resources on this page](#) offer further insight around sex and gender in research studies.

Author contributions

For transparency, we encourage authors to submit an author statement file outlining their individual contributions to the paper using the relevant CRediT roles: Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Funding acquisition; Investigation; Methodology; Project administration; Resources; Software; Supervision; Validation; Visualization; Roles/Writing - original draft; Writing - review & editing. Authorship statements should be formatted with the names of authors first and CRediT role(s) following. [More details and an example](#).

Changes to authorship

Authors are expected to consider carefully the list and order of authors **before** submitting their manuscript and provide the definitive list of authors at the time of the original submission. Any addition, deletion or rearrangement of author names in the authorship list should be made only **before** the manuscript has been accepted and only if approved by the journal Editor. To request such a change, the Editor must receive the following from the **corresponding author**: (a) the reason for the change in author list and (b) written confirmation (e-mail, letter) from all authors that they agree with the addition, removal or rearrangement. In the case of addition or removal of authors, this includes confirmation from the author being added or removed. Only in exceptional circumstances will the Editor consider the addition, deletion or rearrangement of authors **after** the manuscript has been accepted. While the Editor considers the request, publication of the manuscript will be suspended. If the manuscript has already been published in an online issue, any requests approved by the Editor will result in a corrigendum.

Article transfer service

This journal uses the Elsevier Article Transfer Service to find the best home for your manuscript. This means that if an editor feels your manuscript is more suitable for an alternative journal, you might be asked to consider transferring the manuscript to such a journal. The recommendation might be provided by a Journal Editor, a dedicated [Scientific Managing Editor](#), a tool assisted recommendation, or a combination. If you agree, your manuscript will be transferred, though you will have the opportunity to make changes to the manuscript before the submission is complete. Please note that your manuscript will be independently reviewed by the new journal. [More information](#).

Copyright

Upon acceptance of an article, authors will be asked to complete a 'Journal Publishing Agreement' (see [more information](#) on this). An e-mail will be sent to the corresponding author confirming receipt of the manuscript together with a 'Journal Publishing Agreement' form or a link to the online version of this agreement.

Subscribers may reproduce tables of contents or prepare lists of articles including abstracts for internal circulation within their institutions. [Permission](#) of the Publisher is required for resale or distribution outside the institution and for all other derivative works, including compilations and translations. If excerpts from other copyrighted works are included, the author(s) must obtain written permission from the copyright owners and credit the source(s) in the article. Elsevier has [preprinted forms](#) for use by authors in these cases.

For gold open access articles: Upon acceptance of an article, authors will be asked to complete a 'License Agreement' ([more information](#)). Permitted third party reuse of gold open access articles is determined by the author's choice of [user license](#).

Author rights

As an author you (or your employer or institution) have certain rights to reuse your work. [More information](#).

Elsevier supports responsible sharing

Find out how you can [share your research](#) published in Elsevier journals.

Role of the funding source

You are requested to identify who provided financial support for the conduct of the research and/or preparation of the article and to briefly describe the role of the sponsor(s), if any, in study design; in the collection, analysis and interpretation of data; in the writing of the report; and in the decision to submit the article for publication. If the funding source(s) had no such involvement, it is recommended to state this.

Open access

Please visit our [Open Access page](#) for more information.

Elsevier Researcher Academy

[Researcher Academy](#) is a free e-learning platform designed to support early and mid-career researchers throughout their research journey. The "Learn" environment at Researcher Academy offers several interactive modules, webinars, downloadable guides and resources to guide you through the process of writing for research and going through peer review. Feel free to use these free resources to improve your submission and navigate the publication process with ease.

Language (usage and editing services)

Please write your text in good English (American or British usage is accepted, but not a mixture of these). Authors who feel their English language manuscript may require editing to eliminate

possible grammatical or spelling errors and to conform to correct scientific English may wish to use the [English Language Editing service](#) available from Elsevier's Author Services.

Submission

Authors may submit their articles electronically to this journal. The system automatically converts source files to a single PDF file of the article, which is used in the peer-review process. Please note that even though manuscript source files are converted to a PDF file at submission for the review process, these source files are needed for further processing after acceptance. All correspondence, including notification of the Editor's decision and requests for revision, takes place by e-mail, removing the need for a paper trail. Note that contributions may be either submitted online or sent by mail. Please do NOT submit via both routes. This will cause confusion and may lead to your article being reviewed and published twice!

For any technical queries please visit our [Support Center](#).

Cover Letter

The corresponding author must state explicitly in a paragraph how the paper fits the Aims and Scope of the journal. Failure to include the paragraph will result in returning the paper to the author.

Referees

All authors must suggest SIX potential reviewers for their paper upon submission (please include **institutional email addresses ONLY** for all reviewers). The suggested referees should:

- (i) not be close collaborators of the author(s)
- (ii) not be located in the same institution as the author(s) and
- (iii) not all be from the home country.

Avoid suggesting colleagues you have published with previously as this creates a potential conflict of interest. Do not suggest any Editor of this journal.



Preparation

Queries

For questions about the editorial process (including the status of manuscripts under review) or for technical support on submissions, please visit our [Support Center](#).

NEW SUBMISSIONS

Submission to this journal proceeds totally online and you will be guided stepwise through the creation and uploading of your files. The system automatically converts your files to a single PDF file, which is used in the peer-review process.

As part of the Your Paper Your Way service, you may choose to submit your manuscript as a single file to be used in the refereeing process. This can be a PDF file or a Word document, in any format or lay-out that can be used by referees to evaluate your manuscript. It should contain high enough quality figures for refereeing. If you prefer to do so, you may still provide all or some of the source files at the initial submission. Please note that individual figure files larger than 10 MB must be uploaded separately.

References

There are no strict requirements on reference formatting at submission. References can be in any style or format as long as the style is consistent. Where applicable, author(s) name(s),

journal title/book title, chapter title/article title, year of publication, volume number/book chapter and the article number or pagination must be present. Use of DOI is highly encouraged. The reference style used by the journal will be applied to the accepted article by Elsevier at the proof stage. Note that missing data will be highlighted at proof stage for the author to correct.

LINE and PAGE NUMBERING (NEW AND REVISED SUBMISSIONS):

Please ensure the text of your paper is double-spaced and has consecutive(continuous) LINE numbering. Please also ensure to add PAGE numbers to the source file- this is an essential peer review requirement.

Figures and tables

You may embed figures and tables in your WORD manuscript or submit Figures and Tables in separate files in an approved format (TIFF or EPS with the correct resolution for figures and MS Office files for tables)

Peer review

This journal operates a single anonymized review process. All contributions will be initially assessed by the editor for suitability for the journal. Papers deemed suitable are then typically sent to a minimum of two independent expert reviewers to assess the scientific quality of the paper. The Editor is responsible for the final decision regarding acceptance or rejection of articles. The Editor's decision is final. Editors are not involved in decisions about papers which they have written themselves or have been written by family members or colleagues or which relate to products or services in which the editor has an interest. Any such submission is subject to all of the journal's usual procedures, with peer review handled independently of the relevant editor and their research groups. [More information on types of peer review.](#)

REVISED SUBMISSIONS

Use of word processing software

Regardless of the file format of the original submission, at revision you must provide us with an editable file of the entire article. Keep the layout of the text as simple as possible. Most formatting codes will be removed and replaced on processing the article. The electronic text should be prepared in a way very similar to that of conventional manuscripts (see also the [Guide to Publishing with Elsevier](#)). See also the section on Electronic artwork.

To avoid unnecessary errors you are strongly advised to use the 'spell-check' and 'grammar-check' functions of your word processor.

Article structure

Manuscript page limit

There is no restriction on the number of pages but brevity of papers is greatly encouraged. The length of a paper should be commensurate with the scientific information being reported. In particular, the introductory material should be limited to a few paragraphs and results presented in figures should not be repeated in tables.

Subdivision - numbered sections

Divide your article into clearly defined and numbered sections. Subsections should be numbered 1.1 (then 1.1.1, 1.1.2, ...), 1.2, etc. (the abstract is not included in section numbering). Use this numbering also for internal cross-referencing: do not just refer to 'the text'. Any subsection may be given a brief heading. Each heading should appear on its own separate line.

Introduction

State the objectives of the work and provide an adequate background, avoiding a detailed literature survey or a summary of the results.

Material and methods

Provide sufficient details to allow the work to be reproduced by an independent researcher.

Methods that are already published should be summarized, and indicated by a reference. If quoting directly from a previously published method, use quotation marks and also cite the source. Any modifications to existing methods should also be described.

Theory/calculation

A Theory section should extend, not repeat, the background to the article already dealt with in the Introduction and lay the foundation for further work. In contrast, a Calculation section represents a practical development from a theoretical basis.

Results

Results should be clear and concise.

Discussion

This should explore the significance of the results of the work, not repeat them. A combined Results and Discussion section is often appropriate. Avoid extensive citations and discussion of published literature.

Conclusions

The main conclusions of the study may be presented in a short Conclusions section, which may stand alone or form a subsection of a Discussion or Results and Discussion section.

Appendices

If there is more than one appendix, they should be identified as A, B, etc. Formulae and equations in appendices should be given separate numbering: Eq. (A.1), Eq. (A.2), etc.; in a subsequent appendix, Eq. (B.1) and so on. Similarly for tables and figures: Table A.1; Fig. A.1, etc.

Essential title page information

- ***Title.*** Be concise and informative. Titles are often used in information-retrieval systems. Acronyms and brand names of products should not appear in the title of a paper. Instead they may be listed in the key words, and spelled out the first time they appear in the body of the paper.
- ***Author names and affiliations.*** Please clearly indicate the given name(s) and family name(s) of each author and check that all names are accurately spelled. Present the authors' affiliation addresses (where the actual work was done) below the names. Indicate all affiliations with a lower-case superscript letter immediately after the author's name and in front of the appropriate address. Provide the full postal address of each affiliation, including the country name and, if available, the e-mail address of each author.
- ***Corresponding author.*** Clearly indicate who will handle correspondence at all stages of refereeing and publication, also post-publication. **The inclusion of multiple corresponding authors is strongly discouraged. Ensure that the e-mail address is given and that contact details are kept up to date by the corresponding author.**
- ***Present/permanent address.*** If an author has moved since the work described in the article was done, or was visiting at the time, a 'Present address' (or 'Permanent address') may be indicated as a footnote to that author's name. The address at which the author actually did the work must be retained as the main, affiliation address. Superscript Arabic numerals are used for such footnotes.

Highlights

Highlights are mandatory for this journal as they help increase the discoverability of your article via search engines. They consist of a short collection of bullet points that capture the novel results of your research as well as new methods that were used during the study (if any). Please have a look at the examples here: [example Highlights](#).

Highlights should be submitted in a separate editable file in the online submission system. Please use 'Highlights' in the file name and include 3 to 5 bullet points (maximum 85 characters, including spaces, per bullet point).

Abstract

A concise and factual abstract is required. The abstract should state briefly the purpose of the research, the principal results and major conclusions. An abstract is often presented separately from the article, so it must be able to stand alone. For this reason, References should be avoided, but if essential, then cite the author(s) and year(s). Also, non-standard or uncommon abbreviations should be avoided, but if essential they must be defined at their first mention in the abstract itself. Please limit your abstract to **300 words**.

Mandatory graphical abstract

A graphical abstract is mandatory for all Research Papers, Review Articles and Short Communications submitted to this journal. It must be supplied with the initial submission and any subsequent revisions. It should summarize the contents of the article in a concise, pictorial form designed to capture the attention of a wide readership online. Authors must provide images that clearly represent the work described in the article. Graphical abstracts should be submitted as a separate file in the online submission system. Image size: please provide an image with a minimum of 531 × 1328 pixels (h × w) or proportionally more. The image should be readable at a size of 5 × 13 cm using a regular screen resolution of 96 dpi. Preferred file types: TIFF, EPS, PDF or MS Office files. You can view [Example Graphical Abstracts](#) on our information site.

The mandatory highlights are important because they appear online in the Table of Contents of the journal. Highlights that list bullet points about the results are therefore not very informative for readers scanning the contents. Here is an outline of what the highlights should contain:

1. What is the overall scientific problem and why did you study it?
2. How did you address the problem, and which spheres are included?
3. What was the major method used?
4. Major finding(s)
5. Take home message

Do not repeat the highlights in bullet form for the conclusions. The conclusions should be a narrative about what you found and what it means in the broader scheme.

Keywords

Immediately after the abstract, provide a maximum of 6 keywords, using American spelling and avoiding general and plural terms and multiple concepts (avoid, for example, 'and', 'of'). Be sparing with abbreviations: only abbreviations firmly established in the field may be eligible. These keywords will be used for indexing purposes.

The key words of the paper should not contain any words already in the title, but can include abbreviated terms or location information not suitable for the title.

Abbreviations

Define abbreviations that are not standard in this field in a footnote to be placed on the first page of the article. Such abbreviations that are unavoidable in the abstract must be defined at their first mention there, as well as in the footnote. Ensure consistency of abbreviations throughout the article.

Acknowledgements

Collate acknowledgements in a separate section at the end of the article before the references and do not, therefore, include them on the title page, as a footnote to the title or otherwise. List here those individuals who provided help during the research (e.g., providing language help, writing assistance or proof reading the article, etc.).

Formatting of funding sources

List funding sources in this standard way to facilitate compliance to funder's requirements:

Funding: This work was supported by the National Institutes of Health [grant numbers xxxx, yyyy]; the Bill & Melinda Gates Foundation, Seattle, WA [grant number zzzz]; and the United States Institutes of Peace [grant number aaaa].

It is not necessary to include detailed descriptions on the program or type of grants and awards. When funding is from a block grant or other resources available to a university, college, or other research institution, submit the name of the institute or organization that provided the funding.

If no funding has been provided for the research, it is recommended to include the following sentence:

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Footnotes

Footnotes should be used sparingly. Number them consecutively throughout the article. Many word processors build footnotes into the text, and this feature may be used. Should this not be the case, indicate the position of footnotes in the text and present the footnotes themselves separately at the end of the article.

Artwork

Electronic artwork

General points

- Make sure you use uniform lettering and sizing of your original artwork.
- Preferred fonts: Arial (or Helvetica), Times New Roman (or Times), Symbol, Courier.
- Number the illustrations according to their sequence in the text.
- Use a logical naming convention for your artwork files.
- Indicate per figure if it is a single, 1.5 or 2-column fitting image.
- For Word submissions only, you may still provide figures and their captions, and tables within a single file at the revision stage.
- Please note that individual figure files larger than 10 MB must be provided in separate source files.

A detailed [guide on electronic artwork](#) is available.

You are urged to visit this site; some excerpts from the detailed information are given here.

Formats

Regardless of the application used, when your electronic artwork is finalized, please 'save as' or convert the images to one of the following formats (note the resolution requirements for line drawings, halftones, and line/halftone combinations given below):

EPS (or PDF): Vector drawings. Embed the font or save the text as 'graphics'.

TIFF (or JPG): Color or grayscale photographs (halftones): always use a minimum of 300 dpi.

TIFF (or JPG): Bitmapped line drawings: use a minimum of 1000 dpi.

TIFF (or JPG): Combinations bitmapped line/half-tone (color or grayscale): a minimum of 500 dpi is required.

Please do not:

- Supply files that are optimized for screen use (e.g., GIF, BMP, PICT, WPG); the resolution is too low.
- Supply files that are too low in resolution.
- Submit graphics that are disproportionately large for the content.

Color artwork

Please make sure that artwork files are in an acceptable format (TIFF (or JPEG), EPS (or PDF), or MS Office files) and with the correct resolution. If, together with your accepted article, you submit usable color figures then Elsevier will ensure, at no additional charge, that these figures will appear in color online (e.g., ScienceDirect and other sites) regardless of whether or not these illustrations are reproduced in color in the printed version. **For color reproduction in print, you will receive information regarding the costs from Elsevier after receipt of your accepted article.**

Please indicate your preference for color: in print or online only. [Further information on the preparation of electronic artwork.](#)

Figure captions

Ensure that each illustration has a caption. A caption should comprise a brief title (**not** on the figure itself) and a description of the illustration. Keep text in the illustrations themselves to a minimum but explain all symbols and abbreviations used.

Tables

Number tables consecutively with Arabic numerals in accordance with their appearance in the text. Type each table double-spaced on a separate page with a short descriptive title typed directly above and place footnotes to tables below the table body and indicate them with superscript lowercase letters. Avoid vertical rules. Be sparing in the use of tables and ensure that the data presented in tables do not duplicate results described elsewhere in the article. Tables should never be included within the text, because file(s) containing tables are attached separately in the electronic submission system.

Please submit Figures and Tables in separate files in an approved format (TIFF or EPS with the correct resolution for figures and MS Office files for tables).

References

Citation in text

Please ensure that every reference cited in the text is also present in the reference list (and vice versa). Any references cited in the abstract must be given in full. Unpublished results and personal communications are not recommended in the reference list, but may be mentioned in the text. If these references are included in the reference list they should follow the standard reference style of the journal and should include a substitution of the publication date with either 'Unpublished results' or 'Personal communication'. Citation of a reference as 'in press' implies that the item has been accepted for publication.

Reference links

Increased discoverability of research and high quality peer review are ensured by online links to the sources cited. In order to allow us to create links to abstracting and indexing services, such as Scopus, Crossref and PubMed, please ensure that data provided in the references are correct. Please note that incorrect surnames, journal/book titles, publication year and pagination may prevent link creation. When copying references, please be careful as they may already contain errors. Use of the DOI is highly encouraged.

A DOI is guaranteed never to change, so you can use it as a permanent link to any electronic article. An example of a citation using DOI for an article not yet in an issue is: VanDecar J.C., Russo R.M., James D.E., Ambeh W.B., Franke M. (2003). Aseismic continuation of the Lesser Antilles slab beneath northeastern Venezuela. *Journal of Geophysical Research*, <https://doi.org/10.1029/2001JB000884>. Please note the format of such citations should be in the same style as all other references in the paper.

Web references

As a minimum, the full URL should be given and the date when the reference was last accessed. Any further information, if known (DOI, author names, dates, reference to a source publication, etc.), should also be given. Web references can be listed separately (e.g., after the reference list) under a different heading if desired, or can be included in the reference list.

Data references

This journal encourages you to cite underlying or relevant datasets in your manuscript by citing them in your text and including a data reference in your Reference List. Data references should include the following elements: author name(s), dataset title, data repository, version (where available), year, and global persistent identifier. Add [dataset] immediately before the reference

so we can properly identify it as a data reference. The [dataset] identifier will not appear in your published article.

Preprint references

Where a preprint has subsequently become available as a peer-reviewed publication, the formal publication should be used as the reference. If there are preprints that are central to your work or that cover crucial developments in the topic, but are not yet formally published, these may be referenced. Preprints should be clearly marked as such, for example by including the word preprint, or the name of the preprint server, as part of the reference. The preprint DOI should also be provided.

References in a special issue

Please ensure that the words 'this issue' are added to any references in the list (and any citations in the text) to other articles in the same Special Issue.

Reference management software

Most Elsevier journals have their reference template available in many of the most popular reference management software products. These include all products that support [Citation Style Language styles](#), such as [Mendeley](#). Using citation plug-ins from these products, authors only need to select the appropriate journal template when preparing their article, after which citations and bibliographies will be automatically formatted in the journal's style. If no template is yet available for this journal, please follow the format of the sample references and citations as shown in this Guide. If you use reference management software, please ensure that you remove all field codes before submitting the electronic manuscript. [More information on how to remove field codes from different reference management software.](#)

Reference formatting

There are no strict requirements on reference formatting at submission. References can be in any style or format as long as the style is consistent. Where applicable, author(s) name(s), journal title/book title, chapter title/article title, year of publication, volume number/book chapter and the article number or pagination must be present. Use of DOI is highly encouraged. The reference style used by the journal will be applied to the accepted article by Elsevier at the proof stage. Note that missing data will be highlighted at proof stage for the author to correct. If you do wish to format the references yourself they should be arranged according to the following examples:

Reference style

Text: All citations in the text should refer to:

1. *Single author:* the author's name (without initials, unless there is ambiguity) and the year of publication;
2. *Two authors:* both authors' names and the year of publication;
3. *Three or more authors:* first author's name followed by 'et al.' and the year of publication.

Citations may be made directly (or parenthetically). Groups of references can be listed either first alphabetically, then chronologically, or vice versa.

Examples: 'as demonstrated (Allan, 2000a, 2000b, 1999; Allan and Jones, 1999)... Or, as demonstrated (Jones, 1999; Allan, 2000)... Kramer et al. (2010) have recently shown ...'

List: References should be arranged first alphabetically and then further sorted chronologically if necessary. More than one reference from the same author(s) in the same year must be identified by the letters 'a', 'b', 'c', etc., placed after the year of publication.

Examples:

Reference to a journal publication:

Van der Geer, J., Hanraads, J.A.J., Lupton, R.A., 2010. The art of writing a scientific article. *J. Sci. Commun.* 163, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.Sc.2010.00372>.

Reference to a journal publication with an article number:

Van der Geer, J., Hanraads, J.A.J., Lupton, R.A., 2018. The art of writing a scientific article. *Heliyon.* 19, e00205. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00205>.

Reference to a book:

Strunk Jr., W., White, E.B., 2000. *The Elements of Style*, fourth ed. Longman, New York.

Reference to a chapter in an edited book:

Mettam, G.R., Adams, L.B., 2009. How to prepare an electronic version of your article, in: Jones, B.S., Smith, R.Z. (Eds.), *Introduction to the Electronic Age*. E-Publishing Inc., New York, pp. 281–304.

Reference to a website:

Cancer Research UK, 1975. Cancer statistics reports for the UK.

<http://www.cancerresearchuk.org/aboutcancer/statistics/cancerstatsreport/> (accessed 13 March 2003).

Reference to a dataset:

[dataset] Oguro, M., Imahiro, S., Saito, S., Nakashizuka, T., 2015. Mortality data for Japanese oak wilt disease and surrounding forest compositions. Mendeley Data, v1.

<https://doi.org/10.17632/xwj98nb39r.1>.

Reference to software:

Coon, E., Berndt, M., Jan, A., Svyatsky, D., Atchley, A., Kikinon, E., Harp, D., Manzini, G., Shelef, E., Lipnikov, K., Garimella, R., Xu, C., Moulton, D., Karra, S., Painter, S., Jafarov, E., & Molins, S., 2020. Advanced Terrestrial Simulator (ATS) v0.88 (Version 0.88). Zenodo.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.3727209>.

Video

Elsevier accepts video material and animation sequences to support and enhance your scientific research. Authors who have video or animation files that they wish to submit with their article are strongly encouraged to include links to these within the body of the article. This can be done in the same way as a figure or table by referring to the video or animation content and noting in the body text where it should be placed. All submitted files should be properly labeled so that they directly relate to the video file's content. In order to ensure that your video or animation material is directly usable, please provide the file in one of our recommended file formats with a preferred maximum size of 150 MB per file, 1 GB in total. Video and animation files supplied will be published online in the electronic version of your article in Elsevier Web products, including [ScienceDirect](#). Please supply 'stills' with your files: you can choose any frame from the video or animation or make a separate image. These will be used instead of standard icons and will personalize the link to your video data. For more detailed instructions please visit our [video instruction pages](#). Note: since video and animation cannot be embedded in the print version of the journal, please provide text for both the electronic and the print version for the portions of the article that refer to this content.

Data visualization

Include interactive data visualizations in your publication and let your readers interact and engage more closely with your research. Follow the instructions [here](#) to find out about available data visualization options and how to include them with your article.

Supplementary material

Supplementary material such as applications, images and sound clips, can be published with your article to enhance it. Submitted supplementary items are published exactly as they are received (Excel or PowerPoint files will appear as such online). Please submit your material together with the article and supply a concise, descriptive caption for each supplementary file. If you wish to make changes to supplementary material during any stage of the process, please make sure to provide an updated file. Do not annotate any corrections on a previous version. Please switch off the 'Track Changes' option in Microsoft Office files as these will appear in the published version.

Research data

This journal requires and enables you to share data that supports your research publication where appropriate, and enables you to interlink the data with your published articles. Research data refers to the results of observations or experimentation that validate research findings. To facilitate reproducibility and data reuse, this journal also encourages you to share your software, code, models, algorithms, protocols, methods and other useful materials related to the project.

Below are a number of ways in which you can associate data with your article or make a statement about the availability of your data when submitting your manuscript. When sharing data in one of these ways, you are expected to cite the data in your manuscript and reference list. Please refer to the "References" section for more information about data citation. For more information on depositing, sharing and using research data and other relevant research materials, visit the [research data page](#).

Data linking

If you have made your research data available in a data repository, you can link your article directly to the dataset. Elsevier collaborates with a number of repositories to link articles on ScienceDirect with relevant repositories, giving readers access to underlying data that gives them a better understanding of the research described.

There are different ways to link your datasets to your article. When available, you can directly link your dataset to your article by providing the relevant information in the submission system. For more information, visit the [database linking page](#).

For [supported data repositories](#) a repository banner will automatically appear next to your published article on ScienceDirect.

In addition, you can link to relevant data or entities through identifiers within the text of your manuscript, using the following format: Database: xxxx (e.g., TAIR: AT1G01020; CCDC: 734053; PDB: 1XFN).

Research Elements

This journal enables you to publish research objects related to your original research – such as data, methods, protocols, software and hardware – as an additional paper in a [Research Elements journal](#).

Research Elements is a suite of peer-reviewed, open access journals which make your research objects findable, accessible and reusable. Articles place research objects into context by providing detailed descriptions of objects and their application, and linking to the associated original research articles. Research Elements articles can be prepared by you, or by one of your collaborators.

During submission, you will be alerted to the opportunity to prepare and submit a manuscript to one of the Research Elements journals.

More information can be found on the [Research Elements page](#).

Data statement

To foster transparency, we require you to state the availability of your data in your submission if your data is unavailable to access or unsuitable to post. This may also be a requirement of your funding body or institution. You will have the opportunity to provide a data statement during the submission process. The statement will appear with your published article on ScienceDirect. For more information, visit the [Data Statement page](#).



After Acceptance

Online proof correction

Corresponding authors will receive an e-mail with a link to our online proofing system, allowing annotation and correction of proofs online. The environment is similar to MS Word: in addition to editing text, you can also comment on figures/tables and answer questions from the Copy Editor. Web-based proofing provides a faster and less error-prone process by allowing you to directly type your corrections, eliminating the potential introduction of errors.

If preferred, you can still choose to annotate and upload your edits on the PDF version. All instructions for proofing will be given in the e-mail we send to authors, including alternative methods to the online version and PDF.

Offprints

The corresponding author will, at no cost, receive a customized [Share Link](#) providing 50 days free access to the final published version of the article on [ScienceDirect](#). The Share Link can be used for sharing the article via any communication channel, including email and social media. For an extra charge, paper offprints can be ordered via the offprint order form which is sent once the article is accepted for publication. Corresponding authors who have published their article gold open access do not receive a Share Link as their final published version of the article is available open access on ScienceDirect and can be shared through the article DOI link.



Author Inquiries

Visit the [Elsevier Support Center](#) to find the answers you need. Here you will find everything from Frequently Asked Questions to ways to get in touch. You can also find out [when your accepted article will be published](#).

Revision submissions:

*When submitting the revised manuscript, please make sure that you upload the final version of the paper.

*Please remove the old version(s) of the manuscript before submitting the revised version.

*Please **do not upload PDF version** during revision.

If you have any specific questions related due date extensions for revision, please visit our [Support Center](#).

VITA

Vicente José Laamon Pinto Simões, filho de Lucidalva Pinto Simões e José Inácio dos Santos, nascido em 22 de novembro de 1995, em Custódia-PE. Em 2012, ingressou no curso de Agronomia, na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) - Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST) – Serra Talhada - PE. Foi membro do Grupo de Pesquisa em Produção Agrícola no Semiárido, realizando estudos voltados à compreensão de mecanismos bioquímicos e fisiológicos envolvidos com a proteção oxidativa das plantas contra estresses abióticos típicos do semiárido (2014/2015), sob orientação do professor Sérgio Luiz Ferreira da Silva. Foi membro e coordenador discente do Grupo de Estudos e Pesquisas em Forragicultura (GEFOR), colaborando em diversos projetos de pesquisa na área de Forragicultura, com ênfase em forrageiras xerófilas (2015/2019), sob orientação do professor Mauricio Luiz de Mello Vieira Leite. Formou-se em 2017 e no mesmo ano ingressou no curso Mestrado em Produção Vegetal, pelo Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal –UFRPE-UAST, sob orientação do professor Eduardo Soares de Souza. Em 2019 iniciou seu Doutorado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul sob orientação do professor Paulo César de Faccio Carvalho. Foi submetido a banca de defesa de Doutorado em março de 2023.