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

LEONARDO DALLABRIDA MORI

ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO E PRODUTIVIDADE EM UM SISTEMA INTEGRADO DE LONGA DURAÇÃO NO SUL DO BRASIL

Porto Alegre
2024

Leonardo Dallabrida Mori
Engenheiro Agrônomo/UNIJUÍ

ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO E PRODUTIVIDADE EM UM SISTEMA INTEGRADO DE LONGA DURAÇÃO NO SUL DO BRASIL

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Zootecnia, na Faculdade de Agronomia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
Orientador: Prof. Dr. Paulo César de Faccio Carvalho
Coorientador: Prof. Dr. Cimélio Bayer

Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil
Março, 2024

CIP - Catalogação na Publicação

Dallabrida Mori, Leonardo   ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO E PRODUTIVIDADE EM UM SISTEMA INTEGRADO DE LONGA DURAÇÃO NO SUL DO BRASIL/ Leonardo Dallabrida Mori. -- 2024.
78 f.
Orientador: Paulo César de Faccio Carvalho.

Coorientador: Cimélio Bayer.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Integração lavoura-pecuária. 2. Manejo de pastagem. 3. Produção de alimentos. 4. Intensificação sustentável. I. de Faccio Carvalho, Paulo César, orient. II. Bayer, Cimélio, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Leonardo Dallabrida Mori
Engenheiro Agrônomo

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE EM ZOOTECNIA

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

Aprovada em: 18.03.2024
Pela Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
PAULO CESAR DE FACCIO CARVALHO
Data: 09/04/2024 12:46:21-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Paulo Cesar de Faccio Carvalho
PPG Zootecnia/UFRGS
Orientador

Documento assinado digitalmente
EMERSON ANDRE PEREIRA
Data: 08/04/2024 21:03:10-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Emerson André Pereira
UNIJUÍ

DocuSigned by:
Jérôme Bindelle
AD4A03429734456...

Jérôme Bindelle
Uliège

Documento assinado digitalmente
PEDRO ARTHUR DE ALBUQUERQUE NUNES
Data: 05/04/2024 10:14:02-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Pedro Arthur de Albuquerque
Nunes CCGL

Homologado em: 22/05/2024
Por

Ines Andretta
Assinado de forma digital por Ines Andretta
Dados: 2024.05.22 15:30:22 -03'00'

INES ANDRETTA
Coordenadora do Programa de
Pós-Graduação em Zootecnia

Documento assinado digitalmente
PAULO VITOR DUTRA DE SOUZA
Data: 24/05/2024 07:29:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

PAULO VITOR DUTRA DE SOUZA
Vice-Diretor da Faculdade de
Agronomia

Aos meus pais, pelo esforço incansável em me ver realizado, dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me oportunizar viver e realizar sonhos, meu primeiro agradecimento.

Em segundo lugar e aos quais nenhuma palavra é suficiente para traduzir o sentimento de amor e gratidão, agradeço aos meus pais Sérgio e Almanir. Vocês me ensinaram a essência da vida, os princípios e valores que me conduzem todos os dias. Na difícil decisão de encarar mais essa etapa não mediram esforços para que eu pudesse realizar meu sonho, renunciaram ao próprio conforto e, todos os dias, me motivaram a seguir em frente. Vocês são minha base, aos quais devo tudo o que sou e agradeço com todo meu coração!

À minha irmã Emanuele, sou grato por compartilhar a vida, ter se dedicado para minha evolução como ser humano e ter me apoiado nas dificuldades. Pela convivência diária, amizade e ajuda nos dois anos de mestrado, sou muito grato e tenho muito amor por ti!

Agradeço à minha outra metade, Simony, a quem amo tanto e quero amar cada dia mais, por (re)entrar na minha vida e trazer sentido, dividir sonhos e traçar planos e metas. Por compreender e viver junto comigo a jornada da pós-graduação, por ser minha certeza!

Ao professor Paulo Carvalho, que me motivou muito antes do ingresso no mestrado através de suas palavras, agradeço pela confiança e oportunidades, pelo exemplo de liderança e pelas lições científicas e de vida, muito obrigado!

À dupla (falante) Carol e Lóren, pela parceria no período de mestrado e na condução do experimento, pelas longas, mas divertidas viagens à Tupã, pela ajuda braçal, intelectual e emocional nesses dois anos e principalmente pela amizade, obrigado! Ao amigo e colega Laamon, pelos conselhos científicos, direcionamento e ajuda na elaboração desse trabalho e, principalmente, pela amizade, muitíssimo obrigado!

A todo time GPEP, professores, pós-doutorandos, colegas de pós-graduação e bolsistas de iniciação científica, obrigado por tornarem leve a caminhada. À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade de realizar meus estudos, à UNIJUÍ, em nome do professor Emerson, pelas importantíssimas contribuições na condução do experimento, ao professor Cimélio e toda equipe do SOMALCA, muito obrigado pelas orientações, discussões e coletas de solo! Ao Programa de Pós-graduação em Zootecnia e ao incentivo financeiro do CNPq, agradeço!

Um agradecimento especial à Fazenda Espinilho, em nome do Sr. Francisco, por disponibilizarem toda estrutura para a condução do experimento há mais de duas décadas. Ao capataz João Walter e ao Gildo pelas lidas com o gado e de alambrado, à Dionira pelos almoços deliciosos e ao Mateus pelo empenho na condução da lavoura da soja!

A todos aqueles que, mesmo de longe, acreditaram em mim e estiveram me apoiando, família e amigos, meu MUITO OBRIGADO!

"*Tudo que tua mão encontra para fazer, faze-o com todas as tuas faculdades*"

(Eclesiastes 9,10a)

SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA: ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO E PRODUÇÃO DE ALIMENTOS EM EXPERIMENTO DE LONGO PRAZO[1]

Autor: Leonardo Dallabrida Mori
Orientador: Paulo César de Faccio Carvalho

Resumo – Os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) representam uma abordagem contemporânea para reconectar práticas agrícolas e pecuárias. No Sul do Brasil, essa estratégia de produção é principalmente percebida sob a integração de lavouras de grãos estivais com pastejo de herbívoros em gramíneas de inverno. No entanto, a presença de animais nesses sistemas é frequentemente questionada devido à percepção de que afetam negativamente o armazenamento de carbono e a produtividade das lavouras. O presente estudo teve como objetivo avaliar, após 22 anos de experimentação, os efeitos do SIPA e do manejo da pastagem sobre os estoques de carbono e nitrogênio do solo e a produção de alimentos. Um protocolo experimental de longo prazo situado no município de São Miguel das Missões – RS foi utilizado como base para a pesquisa. Os tratamentos consistiram em diferentes intensidades de pastejo por bovinos: alta, moderada e leve (10, 20 e 40 cm de altura do pasto) e um sistema de cultivo puro (SCP) sem pastejo (SP), todos em sucessão à lavoura de soja (*Glycine max* (L.) Merr.). Tais tratamentos foram arranjados em um delineamento experimental de blocos completamente casualizados com 3 repetições. Os estoques de carbono e nitrogênio do solo foram avaliados em 4 momentos ao longo do tempo: 2001, 2004, 2014 e 2023, enquanto as produções dos sistemas foram obtidas a partir da base de dados do protocolo. As variáveis consideradas foram os estoques de carbono e nitrogênio do solo, produção primária, eficiência de uso de nutrientes e água e produção de proteína digestível humana e energia, todas para as fases de lavoura e pastejo. Os resultados mostraram que tanto a presença ou ausência de animais, quanto as intensidades de pastejo, não influenciaram os estoques de carbono e nitrogênio do solo, os quais apresentaram aumento inicial após a implementação do protocolo experimental e mantiveram-se estáveis no decorrer do período avaliado. Quanto à produtividade do sistema, pastos manejados sob intensidade moderada e leve (20 e 40 cm) não prejudicaram a produção primária da pastagem e da soja em relação à ausência de pastejo, além de serem mais eficientes no uso de nutrientes e água quando comparados à alta intensidade de pastejo. A presença do animal influenciou positivamente a produção de alimentos em termos de proteína e energia, com os pastejos moderado e leve apresentando os melhores ganhos. O aumento da intensidade de pastejo (10 cm) e a ausência de animais provocaram as menores produções de energia. Assim, além do SIPA não influenciar negativamente os estoques de carbono e nitrogênio do solo, também promove maior produção de alimentos e energia quando em intensidades de pastejo moderada ou leve. Sob correto manejo da pastagem, os SIPA representam a melhor relação entre produção de alimentos e sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Integração lavoura-pecuária; Manejo de pastagem; Produção de alimentos; Intensificação sustentável.

[1] Dissertação de Mestrado em Zootecnia – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil (78 p.), Março, 2024.

INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEM: SOIL CARBON AND NITROGEN STOCKS AND FOOD PRODUCTION IN A LONG-TERM EXPERIMENT[1]

Author: Leonardo Dallabrida Mori
Advisor: Paulo César de Faccio Carvalho

Abstract - Integrated Crop-Livestock Systems (ICLS) represent a contemporary approach to reconnecting agricultural and livestock practices. In Southern Brazil, this production strategy is mainly perceived through the integration of summer grain crops with herbivores grazing on winter grasses. However, the presence of animals in these systems is often questioned due to the perception that they negatively affect carbon storage and crop productivity. This study aimed to evaluate, after 22 years of experimentation, the effects of ICLS and pasture management on soil carbon and nitrogen stocks and food production. A long-term experimental protocol located in the municipality of São Miguel das Missões – RS was used as the basis for the research. The treatments consisted of different grazing intensities: high, moderate, and low (10, 20, and 40 cm pasture height) and a pure cropping system (PCS) ungrazed (UG), all following soybean cultivation (*Glycine max* (L.) Merr.). These treatments were arranged in a completely randomized block design with 3 replications. Soil carbon and nitrogen stocks were evaluated at 4 points over time: 2001, 2004, 2014, and 2023, while system productions were obtained from the protocol's database. The variables considered were soil carbon and nitrogen stocks, primary production, nutrient, and water use efficiency, and production of human-digestible protein and energy, all for the cropping and grazing phases. The results showed that both the presence or absence of animals and grazing intensities did not influence soil carbon and nitrogen stocks, which initially increased after the implementation of the experimental protocol and remained stable over the evaluated period. Regarding system productivity, pastures managed under moderate and low grazing intensity (20 and 40 cm) did not impair the primary production of pasture and soybean compared to ungrazed and were more efficient in nutrient and water use compared to high grazing intensity. Animal presence positively influenced food production in terms of protein and energy, with moderate and low grazing showing the best gains. Increased grazing intensity (10 cm) and the absence of animals resulted in lower energy production. Thus, in addition to not negatively influencing soil carbon and nitrogen stocks, ICLS also promotes higher food and energy production when under moderate or light grazing intensities. Under proper pasture management, ICLS represents the best balance between food production and environmental sustainability.

Keywords: Crop-livestock integration; Pasture management; Food production; Sustainable intensification.

[1] Master of Science dissertation in Animal Science, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (78 p.), Março, 2024.

SUMÁRIO

RELAÇÃO DE TABELAS

TABELAS CAPÍTULO II

RELAÇÃO DE FIGURAS

FIGURAS CAPÍTULO II

RELAÇÃO DE APÊNDICES

RELAÇÃO DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Capítulo I
SIPA: Sistema integrado de produção agropecuária
C: Carbono
N: Nitrogênio
SCP: Sistema de cultivo puro
GEE: Gases de efeito estufa
COT: carbono orgânico total
MOS: Matéria orgânica do solo
IMC: Índice de manejo de carbono

Capítulo II
ICLS: Integrated crop-livestock systems
C: Carbon
N: Nitrogen
DM: Dry matter
SOC: Soil organic carbon
TN: Total nitrogen
PCS: Pure crop system
UG: Ungrazed
HDP: Human-digestible protein
E: Energy
THP: Total herbage production
P: Phosphorus
K: Potassium
ASF: Animal-sourced food
M_{soil}: Soil mass
BD: Bulk density
T: Thickness of soil layer
T_{add}: Additional thickness
M_{ref}: Soil mass of the reference treatment
M_{layer}: Soil mass of the current layer
$S_{element}$: Soil stock of element
$_{conc}$: Element concentration
HM: Herbage mass
DHAR: Daily herbage accumulation rate
RB: Residual biomass
SR: Stocking rate
LW: Live weight
ADG: Average daily gain
LWG: Live weight gain
PFP: Partial factor productivity
WP: Water productivity
IQR: Interquartile range
AIC: Akaike information criterion

1. CAPÍTULO I

1.1. INTRODUÇÃO

A agricultura é frequentemente considerada a atividade mais importante desenvolvida pelo homem. Através dela se obtém segurança alimentar e ambiental, desenvolvimento econômico e tecnológico e resiliência climática. Contudo, o aumento da população para próximo de 10 bilhões de pessoas até 2050 (Searchinger *et al.*, 2019) exige o planejamento de agroecossistemas orientados para a intensificação sustentável e ecológica (Taube; Nyameasem; Fenger, 2024). Isso se dá pelo fato de que 90% do fornecimento de alimentos deverá decorrer da maximização da produtividade, enquanto apenas 10% será proveniente da expansão de áreas agrícolas (FAO, 2010). Portanto, a simplificação de sistemas especializados e dependentes de insumos e recursos não renováveis necessita ser reconsiderada. Apesar de ter resultado em maiores rendimentos de commodities agrícolas, esse modelo acarretou em sérios impactos ambientais e perda de eficiência e biodiversidade (Gerber *et al.*, 2013).

Soluções fundamentadas nos princípios da natureza são alternativas proeminentes. Exemplo disso é a integração de lavouras com pecuária, que é desenvolvida pelo homem desde a domesticação dos animais (Carvalho *et al.*, 2005) e presente nos ambientes naturais em função dos eventos migratórios (Behnke, 2021). Cientificamente denominados como Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) (Carvalho *et al.*, 2014), essa “integração” possui capacidade superior de regulação e organização em resposta a distúrbios externos, conferindo-lhe resiliência nos aspectos ambiental, econômico e produtivo (Bonaudo *et al.*, 2014; Szymczak *et al.*, 2020), além de prover uma série de serviços ecossistêmicos (Sollenberger *et al.*, 2019, Franzluebbers; Martin, 2022).

No Estado do Rio Grande do Sul, aproximadamente 8 milhões de hectares são destinados ao cultivo de grãos durante o verão, enquanto, no inverno, as culturas comerciais não alcançam 2 milhões de hectares (CONAB, 2024). A diferença na área ocupada entre as duas estações é pouco explorada, com grande parte destinada a cobertura do solo com gramíneas de inverno de alto potencial forrageiro. A implementação dos SIPA é pertinente nessas áreas, dada a capacidade desses sistemas de proporcionar ganhos em eficiência produtiva, econômica e ambiental (Nunes *et al.*, 2021). Acrescente-se a isso que a literatura atual se refere à pecuária bem manejada como oportunidade de mitigação de efeitos adversos ao ambiente e ao sistema produtivo (Carvalho *et al.,* 2018; Souza Filho *et al.*, 2019; Manzatto *et al.*, 2019).

Nesses sistemas, o solo atua como compartimento centralizador dos processos (Anghinoni *et al.*, 2013), refletindo os efeitos decorrentes do manejo de longo prazo (Carvalho *et al.*, 2018). Além disso, tem papel fundamental como reservatório de carbono e armazena quantidades superiores às encontradas na atmosfera e na vegetação terrestre combinadas (FAO; ITPS, 2018). Logo, o sequestro de carbono no solo por meio de atividades agrícolas e pecuárias surge como estratégia essencial para alinhar a produção de alimentos com a sustentabilidade (IPCC, 2021). Para que isso ocorra, é necessário considerar o equilíbrio entre o acoplamento de C e N pela vegetação (autotrófica) e o desacoplamento gerado pelos animais em pastejo (heterótrofos) (Soussana; Lemaire, 2014).

A integração da pecuária à agricultura, especialmente quando em pastejo moderado, permite o “re-acoplamento” dos ciclos biogeoquímicos desses elementos (Lemaire *et al.*, 2023). Como resultado, os estoques de C no solo são mantidos e diminuem-se os riscos de perda de N (atmosfera e hidrosfera) e de emissão de gases de efeito estufa (CH_4 e N_2O). Entretanto, é desafio para a pesquisa desenvolver experimentos de campo a longo prazo adequados e modelos baseados em processos que justifiquem essas informações (Lemaire *et al.*, 2014a). Em relação aos estoques de carbono do solo, há compreensão limitada sobre como o manejo da pastagem nos SIPA impacta sua capacidade de acumulação a longo prazo e a relação desta com a produtividade. Uma vez que o uso exclusivo do Sistema Plantio Direto como prática conservacionista pode não ser suficiente para o aumento do estoque de carbono no solo e para mitigação de mudanças climáticas (Cai *et al.*, 2022), o sinergismo oriundo das diferentes fases dos SIPA pode potencializar os resultados, tanto produtivos quanto de conservação de recursos ambientais.

Apesar de o solo ser importante dreno potencial de carbono, a produtividade primária líquida, que reflete a capacidade de sequestro de carbono pela vegetação, também deve ser considerada (Liu *et al.*, 2021). Além disso, a produtividade dos diferentes sistemas é indicadora do potencial em provisão de alimentos e contribuição para a segurança alimentar. Desse modo, a união de ambas as informações possibilita um olhar holístico para os sistemas de produção, pelo qual se considera não só os benefícios ambientais, mas também para a contribuição direta em produção de alimentos para atender as demandas globais. Considerando ainda que os SIPA sob correto manejo da pastagem apresentam produtividade primária líquida mais elevada (Kunrath *et al.*, 2020; Simões *et al.*, 2023), é fundamental considerar a produção do sistema para delinear estratégias para mitigar as alterações climáticas.

Assim, este estudo buscou investigar o impacto de diferentes intensidades de pastejo por bovinos em um sistema integrado com lavoura de grãos, e também a ausência de animais, sobre o estoque de carbono e nitrogênio no solo no longo prazo. Ademais, este trabalho explora as possíveis implicações na produtividade do sistema e na capacidade dos diferentes modelos de produção em prover alimentos diretamente disponíveis para o consumo humano. Os resultados serão apresentados no Capítulo II desta dissertação, na forma de artigo científico.

1.2. HIPÓTESES DE ESTUDO

O presente estudo foi realizado a partir das seguintes hipóteses:

1. O uso de um SIPA no modelo de integração lavoura-pecuária (soja + bovinos de corte) sob diferentes intensidades de pastejo apresenta estoque de carbono no solo semelhante aos sistemas de cultivo puro (SCP) (soja + cobertura de solo), ambos sob a condição de plantio direto e avaliados a longo prazo;
2. O SIPA resulta em aumento de provisão de alimentos na mesma unidade de área quando a fase pastagem é manejada em intensidade de pastejo moderada.

1.3. OBJETIVOS

Os objetivos do presente estudo foram avaliar dois sistemas de produção (SIPA no modelo de lavoura de grãos de soja e pastejo de bovinos de corte em pastagem anual de inverno sob diferentes intensidades de pastejo e SCP de lavoura de grãos de soja e cobertura de solo com gramíneas de inverno) quanto ao estoque de carbono orgânico e nitrogênio total do solo após 22 anos, descrever seu comportamento temporal e avaliar a capacidade de produção de alimentos desses sistemas.

1.4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O solo é a memória do sistema. Nele irão se refletir os efeitos e as consequências das interações nas escalas de planta, animal e atmosfera. Nos sistemas integrados a sua importância é ainda mais proeminente, uma vez que as interações entre os diferentes componentes são intensificadas. Compreender a interdisciplinaridade dos SIPA, o impacto que o manejo do animal tem em cada fase do sistema e o seu comportamento ao longo do tempo é fundamental. Tais aspectos definem a direção e intensidade dos processos dentro do sistema, indicando o quão alinhada uma proposta de trabalho está com os interesses humanos atuais: produzir mais, melhor e de forma sustentável. Nesse contexto, a revisão a seguir abordará o histórico e conceitos acerca dos SIPA e sua relação com o potencial do solo em armazenar carbono, contribuir para a mitigação das mudanças climáticas e ser uma alternativa quanto a produção de alimentos para atender as futuras demandas globais.

1.4.1. SIPA: uma via concreta para a intensificação sustentável

O uso integrado de sistemas de cultivo e criação na agricultura teve origem na Antiguidade e visava a recuperação da fertilidade do solo para o aumento dos rendimentos dos cereais cultivados (Mazoyer; Roudart, 2010). Nesse formato de agricultura ancestral, os sistemas integrados resumiam-se ao fornecimento de nutrientes ao solo via dejetos de animais. Portanto, a ciclagem de nutrientes, por transferência, representava o pilar conceitual do sistema (Moraes *et al.*, 2018). Atualmente, com um novo e amplo contexto da agricultura, os objetivos vão além. Apesar de tais sistemas terem sua origem remota, estiveram em processo de coevolução frente às diferentes realidades, e, hoje, direcionam-se à participação em sistemas produtivos mais sustentáveis e lucrativos.

De acordo com as terminologias propostas pela FAO, no Brasil esse modelo de produção é definido cientificamente como Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (Carvalho *et al.*, 2014) . Porém, no meio acadêmico, muitos trabalhos se referem a esses sistemas como Integração Lavoura Pecuária, o que, na verdade, é entendido como um formato de SIPA e está mais relacionado a um termo técnico. O conceito de SIPA, portanto, envolve uma questão mais abrangente, na qual os componentes animais e vegetais podem ir muito além de culturas comerciais de grãos e animais em pastejo.

A multifuncionalidade dos SIPA é percebida através dos vários princípios amplamente apresentados na literatura, os quais envolvem a promoção da biodiversidade, mimetização da natureza, intensificação dos processos ecológicos, reciclagem de nutrientes, mitigação de gases de efeito estufa, acúmulo de carbono no solo, controle de plantas daninhas, dentre outros (Carvalho *et al.*, 2021). Trata-se de um posicionamento intermediário frente a uma gama de sistemas de produção, abrangendo conteúdos diversos a respeito da agroecologia (Bonaudo *et al.*, 2014), ecologia industrial (Thomas *et al.*, 2014) e intensificação sustentável (FAO, 2010). Os SIPA são planejados visando favorecer interações sinérgicas e/ou as chamadas propriedades emergentes (Carvalho; Nunes; Anghinoni, 2018). Sinergia, por definição, refere-se a uma ação associada na qual dois ou mais elementos atingem resultado superior àquele que seria alcançado individualmente.

Nesse sentido, uma importante característica dos SIPA é o planejamento, o qual inclui duas dimensões fundamentais nos arranjos produtivos: as interações espaciais e temporais. Trata-se, portanto, do principal aspecto que diferencia os verdadeiros sistemas integrados de sucessões forrageiras e agrícolas sem base conceitual fundamentando as tomadas de decisões. Para exemplificar o aspecto espacial, Moraine *et al.* (2017) propuseram um sistema socioecológico a fim de analisar a dimensão territorial dos sistemas integrados, o qual busca elucidar interações entre fazendas que vão além de operações comerciais. Já o efeito temporal do sistema se refere tanto à duração de permanência de um componente (animal ou agrícola), quanto ao tempo total de planejamento do sistema (arranjos produtivos repetidos ao longo do tempo) (Moraes *et al.*, 2018). Resultado do planejamento é a maior resiliência do sistema, aumentando a eficiência de uso dos recursos enquanto se diminuem riscos frente à eventos climáticos adversos (Farias *et al.*, 2020; Szymczak *et al.*, 2020).

Frente ao modelo contemporâneo de agricultura pautada sobre a tecnologia de insumos, os SIPA têm em seu princípio a filosofia de sistemas agrícolas baseados em processos (Carmona *et al.*, 2018). Dentro dessa proposta, busca-se maior aproximação da produção agrícola com os eventos dos ambientes naturais, através da manutenção da biodiversidade e promoção de serviços ecossistêmicos (Lemaire *et al.*, 2023). A reconexão do pastejo animal em sistemas especializados de produção de grãos restaura ciclos biogeoquímicos desacoplados por paisagens uniformes, renovando a diversidade necessária para o adequado funcionamento do ecossistema (Carvalho *et al.*, 2021).

No contexto agrícola brasileiro, historicamente apresentou-se um predomínio da separação entre agricultura e pecuária. No entanto, o uso de ungulados com a intenção de repor os nutrientes ao solo para cultivos subsequentes foi uma técnica muito utilizada desde a antiguidade, justificada pelo efeito de ciclagem de nutrientes (Searle; Shipley, 2008). Na prática, a interação temporal entre cultivos agrícola e pecuária remetem aos eventos de domesticação de plantas e animais, há milhares de anos (Bogaard *et al.*, 2013; Russelle *et al.*, 2007). No que se refere à expansão dos SIPA no Brasil, entre 2005 à 2015 a área ocupada saiu de 1,87 para 11,47 milhões de hectares, sendo que até 2030 se projeta uma ocupação entre 22,27 e 29,32 milhões de hectares (Polidoro *et al.*, 2020), indicando uma constante evolução de área ao longo do tempo. No sul do país, os arranjos produtivos que incluem animais no sistema se resumem à sucessão de lavouras de grãos no verão (arroz, milho e soja) e pastagens anuais de inverno (azevém e aveias) com pastoreio (Anghinoni; Carvalho; Costa, 2013).

Em discordância à proposta dos SIPA, existem posicionamentos desfavoráveis vinculados a suposições negativas quanto à presença do animal em pastejo. O impacto do casco no adensamento do solo, menor resíduo de palha no sistema e presença de plantas indesejáveis são questões comumente reproduzidas. No entanto, Peterson *et al.* (2019) e Kunrath *et al.* (2015) apresentam que a presença do animal no sistema não afeta a produtividade da lavoura de grãos subsequente. O manejo do pasto em intensidades moderadas é o que determina o sucesso do sistema, favorecendo a lavoura de grãos, a produção da pastagem e o desempenho animal (Carvalho *et al.*, 2018; Kunrath *et al.*, 2020). Quanto à compactação do solo, há maior adensamento no período pós pastejo, o qual é revertido na fase lavoura do sistema pelo próprio estabelecimento da cultura, atividade biológica intensa e decomposição das raízes da pastagem, o que favorece a regeneração da estrutura do solo (Ambus *et al.*, 2018; Bell *et al.*, 2011). Em terras baixas, Dominschek *et al.* (2022) observaram que sistemas de cultivo com rotação entre arroz e pastagens hibernais com bovinos em pastejo expressaram maior declínio no banco de sementes de plantas daninhas.

A inserção do componente animal em pastejo traz à luz temas amplamente debatidos por entidades públicas e privadas como, por exemplo, o impacto dos rebanhos de ruminantes nas emissões de GEE e nos estoques de carbono no solo. Damian *et al.* (2023) demonstram que a adoção de sistemas integrados com presença do componente animal aumentou esses estoques de carbono em clima subtropical úmido. Ademais, as relações construídas através destes modelos de produção promovem qualidade de estrutura de solo podendo beneficiar o acúmulo de forragem ao longo do ciclo de produção (Simões *et al.*, 2023). A utilização dos SIPA também contribui para manter e conservar a biodiversidade de plantas, animais e microrganismos que apoiam a atividade agropecuária (Jones *et al.*, 2021), melhorando o desempenho de funções dos ecossistemas como controle de pragas, polinização e manutenção da fertilidade do solo (Gaba *et al.*, 2018).

Do ponto de vista da contribuição para a segurança alimentar os SIPA têm destaque. Nesses sistemas a estabilidade da produção de proteína digerível pelo homem é maior frente à modelos especializados de lavouras de grãos (Nunes *et al.*, 2021). Além disso, a qualidade dessa proteína é maior por, em parte, ser proveniente da carne. Os alimentos de origem animal, ao contrário do que é erroneamente divulgado, são responsáveis por garantir grande parte dos requerimentos globais de vitaminas, ácidos graxos de cadeia longa, minerais em formas biodisponíveis, além de compostos bioativos responsáveis pela melhoria da saúde (Leroy *et al.*, 2023). Por esse motivo, essa fonte de alimentos desempenha um papel crucial no combate à fome e desnutrição, no alívio da pobreza, na segurança alimentar e na saúde (Adesogan *et al.*, 2020).

Sob a perspectiva da necessidade de mudança e transformação nos sistemas de produção e nos processos produtivos, a elaboração de soluções locais para problemas globais é eminente. No Sul do Brasil, iniciativas como o PISA – Produção Integrada de Sistemas Agropecuários, que propõe em seu arranjo de estratégias uma abordagem holística com promoção do desenvolvimento sustentável das propriedades, é desenvolvido desde 2007 (Carvalho *et al.*, 2022). O programa possui uma gama de tecnologias e processos em suas ferramentas de aplicação, abrangendo diferentes seções da propriedade rural, as quais envolvem, também, o uso dos SIPA. As principais ferramentas propostas preveem atuar estrategicamente no manejo do solo, manejo dos SIPA, manejo de pastagens, manejo ambiental, bem-estar animal e na gestão da propriedade rural.

No Estado do Rio Grande do Sul aproximadamente 3000 famílias que possuem como atividade a bovinocultura de leite já foram atendidas pelo programa. Através dessa iniciativa se promove e se fortalece a organização da base produtiva através dos princípios da intensificação sustentável. Os impactos, provenientes de ações individuais e coletivas, envolvem melhoria da rentabilidade e diminuição dos custos de produção, qualificando os produtores para melhor gestão econômica das propriedades, modificando positivamente a condição social das famílias e a integridade ambiental das áreas de produção e, por fim, promovendo o empoderamento das famílias para que haja continuidade na condução dos novos modelos implementados de acordo com pilares da sustentabilidade.

1.4.2. Intensidade de pastejo: o fator determinante para o sucesso do sistema

As pastagens ocupam 40% do território livre de gelo ao redor do mundo (Blair; Nippert; Briggs, 2014), contribuindo com o fornecimento de diversos serviços ecossistêmicos. Elas compõem um ecossistema que regula várias atividades humanas, e necessitam ser compreendidas para continuar a desempenhar seu papel. No mesmo sentido, a compreensão das exigências do animal em pastejo é um requisito para desenvolver sistemas pastoris inovadores. A eficiência de colheita de forragem, por outro lado, foi por muito tempo considerado o mais importante no processo de pastejo. No entanto, por meio dessa perspectiva, as ações de manejo raramente correspondem às necessidades dos animais, mas sim aos objetivos humanos.

No estudo do manejo de pastagens é importante o entendimento acerca das diferentes intensidades de pastejo. É comum na literatura se observar várias abordagens relacionadas a esse conceito. Becker *et al.* (2022) relacionam as intensidades (leve, moderada e alta) à área foliar residual após um evento de pastejo. Nota-se que, nesse contexto, há uma relação com momentos de pastejo e descanso (pastoreio rotativo). Chapman e Lemaire (1996) relacionam a intensidade de pastejo com o percentual de matéria seca colhida pelo animal. Barbosa *et al.* (2008), por sua vez, descrevem como a relação entre a quantidade de forragem disponível e a demanda da mesma pelos animais. Por outro lado, uma forma simples de classificar a intensidade de pastejo é pela altura do pasto. Essa é uma abordagem passível de ser aplicada em qualquer método de pastoreio e de fácil utilização.

O potencial de produção na atividade pecuária depende de fatores relacionados à planta, ao animal e ao manejo desses dentro de um intervalo espaço-temporal. A intensidade de pastejo, definida através de alturas de manejo, determina o potencial produtivo de uma pastagem, limitando ou maximizando o consumo de forragem pelo animal. Também causa respostas no componente vegetal, afetando o rebrote, crescimento radicular e a qualidade do alimento. Assim, cada espécie forrageira tem uma estrutura ideal na qual o balanço entre eficiência de colheita e utilização é equilibrado (Carvalho, 2013).

Tendo isso posto, entende-se que a produção animal em pastagens dependa, dentre outros fatores, da relação existente entre o comportamento ingestivo do animal e as características da forragem. Dessa forma, o manejo da intensidade de pastejo é determinante para os ganhos do animal (kg de carne ou litros de leite). Essa importante ferramenta atua diretamente sobre a estrutura do pasto, e, consequentemente, sobre a taxa de ingestão (Bels, 2006). Sollenberger *et al.* (2019) sugerem que a pecuária deve ser baseada em processos que reduzam os conflitos entre a produção da forrageira e do animal. Portanto, o ajuste do manejo é a principal estratégia para melhorar a produtividade animal e reduzir os impactos ambientais negativos (Savian *et al.*, 2018).

O correto manejo da pastagem busca a manutenção de estruturas que otimizem a colheita de forragem pelo animal. Nesse caso, a altura do dossel se enquadra como forma de controle do processo de rebrote do pasto e da intensidade de pastejo (Sbrissia; Da Silva; Nascimento Júnior, 2007). A mesma é determinante para a produtividade do sistema, tendo relação com a produção animal, resíduo de palhada para a cultura subsequente, produção de grãos e características químicas, físicas e biológicas do solo (Moraes *et al.*, 2014). O aumento da intensidade pela diminuição da altura do pasto afeta a profundidade do bocado do animal e limita a sua massa (Laca *et al.*, 1992). Dessa forma, a homogeneização do pasto via rebaixamentos excessivos – o que é uma prática comum – não é sinônimo de eficiência (Nunes *et al.*, 2016). Nesse caso há, inclusive, aumento no tempo de pastejo dos animais devido à baixa disponibilidade de forragem (Baggio *et al.*, 2008). Por outro lado, pastos demasiadamente altos dificultam a formação do bocado, principalmente pela estruturação e arranjo do dossel vegetal (Carvalho *et al.*, 2001).

Associado à preocupação em disponibilizar ao animal a estrutura ótima em que a taxa de ingestão seja maximizada, há que se garantir à planta condições em que o rebrote e persistência sejam preservados. Moojen *et al.* (2022) destacam que a intensidade de pastejo, e não os métodos de pastoreio, é a principal variável a ser manejada nos sistemas integrados, na medida em que determina o nível de produção animal obtido durante o ciclo pastoril e as condições de solo e de palhada que se transferem à fase agrícola. No mesmo sentido, Byrnes *et al.* (2018) apontam a intensidade de pastejo como o mais forte preditor de resultados agrícolas e ecológicos, envolvendo a função e a saúde do solo.

Do ponto de vista do animal, uma vez que o bocado se constitui como o "átomo" no processo de pastejo (Laca; Ortega, 1996), a massa de forragem colhida a cada movimento mandibular é fator mais importante que a quantidade de apreensões (Galli; Cangiano; Fernández, 1996; Carvalho *et al.*, 2016). A massa do bocado, por sua vez, está diretamente relacionada com a sua profundidade. Considera-se que animais em pastejo, de modo geral, causam o rebaixamento próximo à metade da estrutura que se apresenta. Nesse sentido, Boval e Sauvant (2021) indicam que a altura do pasto é a característica que melhor explica variações na massa do bocado. Com isso, a intensidade de pastejo, determinada pela altura de manejo do pasto, novamente se enquadra como principal fator a se considerar dentro do sistema. Em SIPA, essa relevância é ainda maior, uma vez que a diversidade de componentes do sistema aumenta e a intensidade de pastejo pode influenciar não só a fase pastagem, mas também a lavoura e o solo.

Dessa forma, percebe-se que a abordagem sistêmica em SIPA deve prevalecer. Para tanto, é fundamental uma visão holística sobre o conjunto das partes, na qual a transdisciplinaridade atue sobre a compreensão do todo. Ao mesmo tempo em que se busca alta eficiência produtiva do componente animal, é preciso levar em conta as demais etapas do arranjo planejado. Por isso, a definição da intensidade de pastejo ideal deve ocorrer quando o resultado do sistema é superior à soma das partes (sinergismo). Inclui-se nisso ganhos produtivos e econômicos, mas também ambientais e sociais.

1.4.3. O solo como reservatório de C e N

O solo é o principal armazenador terrestre de carbono orgânico e sua capacidade é 3 a 4 vezes maior que a atmosfera (Stoorvogel *et al.*, 2017). O estoque global de carbono orgânico no solo na camada 0 a 30 cm é de 680 Gt (FAO; ITPS, 2018), sendo que a maior proporção do estoque está abaixo dessa camada (Batjes, 1996). Dessa forma, o solo atua como sumidouro de CO_2 atmosférico através da adoção de práticas de manejo sustentáveis que reduzem as perdas de C, como o sistema de plantio direto, ou que aumentam as entradas anuais de C e N por sistemas de cultivo produtivos e diversificados.

O carbono orgânico total do solo (COT) é o principal componente da matéria orgânica do solo, a qual fornece nutrientes, melhora a fertilidade do solo e a disponibilidade de água às plantas (FAO; ITPS, 2018). Por esse motivo, contribui diretamente para a produção de alimentos e mitigação e adaptação às mudanças climáticas. O COT é também indicador da saúde do solo, a qual reflete a capacidade do solo de responder ao manejos implementados e continuar a apoiar tanto a produção agrícola como a prestação de outros serviços ecossistêmicos (Kibblewhite; Ritz; Swift, 2008). Portanto, o acúmulo de COT, além de ser por si próprio um serviço ecossistêmico, favorece diversos outros. O seu incremento implica em redução da eutrofização de águas e erosão, melhoria da estabilidade estrutural do solo, porosidade, aeração e capacidade de filtragem da água, o que, por sua vez, pode melhorar a produtividade dos alimentos.

Logo, melhorias nas práticas de manejo da agricultura e pecuária devem ser buscadas visando o incremento do COT. As pastagens representam um importante ecossistema de acúmulo e sequestro de C, uma vez que promovem a melhoria da agregação do solo, redução de erosão, aumento de biomassa radicular e, em consequência, do potencial de rizodeposição e liberação de exsudatos no interior do solo (McNally *et al.*, 2015; Rodrigues *et al.*, 2022). Para isso, no entanto, é necessário que se adote um cenário de pastejo ótimo (considerando a intensidade, frequência, duração e tempo de pastejo) em que os benefícios estruturais do ecossistema que emergem das respostas ecofisiológicas das plantas maximizem os resultados de sequestro de carbono no solo (Stanley *et al.*, 2024).

Nos SIPA, o solo se comporta como a memória do sistema (Anghinoni *et al.*, 2017) e tem seus atributos influenciados pelo manejo dos animais em pastejo. Assim como a intensidade de pastejo determina o equilíbrio entre produção de forragem e resultado do animal, a mesma variável exerce forte influência sob os processos de ciclagem de C e N no solo (Zhou *et al.*, 2017). Apesar disso, muitos são os estudos em que a intensidade de pastejo não é bem fundamentada, levando a interpretações equivocadas dos resultados.

Em ecossistemas de pastagens, os ciclos de C e N são fortemente acoplados pela estequiometria elementar da autotrofia das plantas e da heterotrofia microbiana do solo (Soussana; Lemaire, 2014). Porém, a inserção do animal nesse ambiente é fator de estresse para essa relação de equilíbrio, já que causa a desacoplagem desses ciclos. Nesse processo, aumenta-se a vulnerabilidade a perdas de C devido a sua liberação em formas gasosas (CO_2 e CH_4), enquanto o N fica sujeito a volatilização e lixiviação devido a sua liberação em altas concentrações através da urina dos animais. Para que esse tipo de impacto ambiental seja controlado, o ajuste do manejo das pastagens é fundamental. Em intensidades de pastejo leves, os animais aumentam a ciclagem de N e a produtividade primária líquida do pasto, o que pode favorecer o acúmulo de C no solo (Anghinoni *et al.*, 2017).

A produtividade primária líquida determina os fluxos de C e N da atmosfera para a vegetação e solo, e, por isso, exerce influência na capacidade de sequestro. No entanto, o acúmulo de C e N se dá também em virtude do tempo médio de residência desses elementos nos diferentes compartimentos. Nesse aspecto, a origem e a qualidade dos resíduos que são depositados no sistema exercem forte influência (Stanley *et al.*, 2024), determinando a labilidade do C acumulado. A labilidade se refere à parte do C mais ativo no solo (mais facilmente oxidável e disponível à microbiota), e, portanto, fornece indicativo da taxa de retorno do C (Ayarza *et al.*, 2022; Blair; Lefroy; Lisle, 1995). A fração lábil do C e N é bastante sensível às mudanças causadas pelo tipo de manejo e uso do solo (Dhaliwal; Kumar, 2021). Nesse aspecto, o fator determinante da labilidade dos estoques de C e N no solo é a relação C:N dos resíduos que são incorporados ao sistema.

Essa relação indica a proporção de C para N na composição do material orgânico. Em geral, quanto mais baixo for esse valor, maior sua labilidade e maior a taxa de retorno do C pela decomposição do material por microrganismos. Nesse processo, parte do C incorporado retorna à atmosfera via CO_2 (Bayer; Mielniczuk; Martin-Neto, 2000), enquanto o restante é incorporado à MOS. De modo geral, a relação C:N ideal dos resíduos para disponibilização de nitrogênio para as plantas se encontra próxima a 20:1. Quando os valores de carbono são mais altos que 30, o N é imobilizado pela fauna do solo, no processo de decomposição, enquanto relações menores que 15:1 são mais suscetíveis à perda do N por processos de volatilização e lixiviação.

1.4.4. SIPA no sul do Brasil: avanços da pesquisa em C e N do solo em 22 anos de protocolo experimental

Apesar dos SIPA representarem um conceito antigo que evoluiu junto com a história da agricultura, a pesquisa aplicada nessa área ainda é recente e são poucos os estudos de longo prazo existentes. Normalmente, a ciência está mais focada em compreender aspectos isolados dentro de uma determinada área de interesse. Todavia, no caso dos SIPA, é necessário um enfoque multidisciplinar e sistêmico, a fim de se compreender cada processo dentro das interações que ocorrem entre os diferentes componentes (solo-planta-animal-atmosfera) e suas relações de causa e efeito.

No que diz respeito ao estudo do solo dentro do contexto dos sistemas integrados, o protocolo experimental base para a realização deste projeto é a principal fonte de resultados para a região sul do Brasil. Estudos com estoque e balanço de C e N do solo nesse sistema vêm sendo desenvolvidos ao longo de 22 anos. Os resultados encontrados até o momento permitem analisar a evolução do sistema e fornecem embasamento científico sobre o potencial de uso e implementação desse modelo de produção nas propriedades rurais.

Souza *et al.* (2009) apresentaram os primeiros resultados do protocolo envolvendo os estoques de C e N. No trabalho conduzido pelos autores, foram obtidos dados no início do experimento (2001) e após três (2004) e seis anos (2007), avaliando a camada de 0 a 20 cm do solo. O primeiro ponto a se destacar é que a inserção do animal no sistema não prejudicou o acúmulo de carbono quando o manejo da pastagem foi menos intensivo. Passados os três primeiros anos do protocolo, o incremento médio anual de C foi de 1,16 Mg ha^{-1} e de N de 115 kg ha^{-1}. No entanto, do terceiro para o sexto ano, a intensidade de pastejo passou a exercer influência nos estoques de C e N na camada superficial do solo, sendo que em alta intensidade (10 cm da altura do pasto) houve significativo decréscimo no incremento médio anual, enquanto as intensidades moderada e leve mantiveram-se constantes.

Os mesmos autores concluíram que as intensidades de pastejo moderada e leve (20 e 40 cm) promoveram aumento nos estoques de C e N no SIPA na mesma proporção da área livre dos animais (sem pastejo). Por outro lado, o pastejo intenso causou a perda desses elementos com o decorrer do tempo. A partir desse resultado é possível perceber que, com o manejo adequado das pastagens, pode-se manter e melhorar a qualidade do solo de forma semelhante às áreas em que não há a inserção do componente animal. Essa informação reforça a capacidade dos SIPA em possibilitar o aumento da produção (através do animal) com economia de recursos (em extensão de terra) sem prejudicar a fase subsequente do sistema (lavoura) (Kunrath *et al.*, 2015; Nunes *et al.*, 2021).

Assmann *et al.* (2014) avaliaram os estoques de C e N do mesmo experimento após 9 anos de condução, porém utilizando a camada de solo de 0 a 40 cm. Foi identificado que tanto o C quanto o N total apresentaram menores valores sob alta intensidade de pastejo. Enquanto isso, as demais intensidades de pastejo apresentaram adição anual média de C de 0,96 Mg ha^{-1} ano^{-1}, a partir da primeira amostragem (2001) considerando aquela camada de solo (0 a 20 cm). Os autores também avaliaram o IMC do solo, o qual indicou que as intensidades moderadas de pastejo levaram a uma qualidade do solo semelhante à de áreas não pastoreadas.

Silva *et al.* (2014), por sua vez, analisaram os índices de C do solo após 10 anos de andamento do protocolo experimental, considerando a camada de 0 a 20 cm. Os resultados de estoque de carbono foram semelhantes estatisticamente no manejo das intensidades de pastejo. No entanto houve maiores perdas de COT do sistema onde os pastos foram manejados sob alta intensidade. Isso fica evidenciado pelo balanço negativo de C nesse tratamento, atuando como fonte de C para a atmosfera. Por outro lado, observou-se que o sistema passou a atuar como dreno de C nas intensidades de pastejo moderada e leve, contribuindo do ponto de vista ambiental para a redução de emissões de gases e sequestro de carbono.

Cecagno *et al.* (2018) realizaram nova avaliação do estoque de C orgânico do solo decorridos 13 anos do início do experimento, também na camada de 0 a 20 cm. Nessa análise não se evidenciaram diferenças significativas para o estoque de C orgânico entre as diferentes intensidades de pastejo. No entanto, os autores apontam que essa semelhança provavelmente se devesse a mecanismos compensatórios. Ainda que o tratamento de alta intensidade de pastejo (10 cm) tenha apresentado o menor aporte de resíduos, a diferença esperada foi compensada pelo crescimento radicular (Souza *et al.*, 2008), levando a estoques de C semelhantes aos demais tratamentos. Porém, ao realizarem simulação da evolução temporal dos estoques de C ao longo do tempo, os autores observaram maior potencial de acúmulo nos tratamentos menos intensivos (altura do pasto de 30 ou 40 cm) do que nos mais intensivos (10 ou 20 cm).

Nota-se que ainda há discordância nos resultados encontrados até o presente momento em virtude do tempo decorrido. O IPCC (2021) indica o tempo médio de 20 anos para que o solo atinja estabilidade (no que se refere à acúmulo de carbono) após a implementação de um manejo conservacionista. Além disso, Ayarza *et al.* (2022) sugerem que seja utilizada a profundidade de 0 a 100 cm para avaliar o efeito do sistema radicular de gramíneas quando em pastejo e a capacidade dos SIPA em sequestrar carbono em profundidade. No entanto, o que se percebe é que os SIPA são uma forma de uso da terra (recurso) que apresenta potencial para contribuir com a manutenção, ou até mesmo acúmulo, de carbono no solo através da melhoria de produtividade primária líquida e redução das perdas por emissões de gases de efeito estufa. No entanto, para que isso seja alcançado, o manejo do componente animal na fase pastoril do sistema é de fundamental importância.

1.4.5. Os SIPA como alternativa para maximizar a produção de alimentos

Além da importância no quesito ambiental como estratégia para preservar o carbono no solo, os SIPA têm destaque quando se considera o potencial de produção de alimentos por unidade de área. Vários são os estudos evidenciando maior capacidade produtiva nos mais variados modelos de produção que envolvem a interação entre os componentes planta-animal (Kunrath *et al.*, 2020; Franzluebbers; Martin, 2022; Simões *et al.*, 2023). Esses sistemas são mais vantajosos no quesito de produção de alimentos: representam um potencial de acréscimo de 55% em termos proteína digestível humana quando da presença de pastejo em áreas de monocultivo de soja (Nunes *et al.*, 2021), além de mais eficientes do ponto de vista do uso dos recursos, resultando em um aumento de 22,5% em produção de energia (Farias *et al.*, 2020).

Esse saldo positivo em relação à sistemas tradicionais ou monoculturas está diretamente relacionado com a presença de animais em pastejo nas áreas onde os SIPA são implementados. Nesses sistemas, além do resultado em termos de produção de alimentos provenientes principalmente de lavouras de grãos, o animal colabora com a entrega de produtos de alto valor biológico, como carne e leite (Leroy *et al.*, 2023). Além da contribuição na produção de alimentos pelos animais, soma-se os mais variados subprodutos desenvolvidos a partir da cadeia de produção animal. O movimento somente da pecuária de corte em 2022 no Brasil foi de US$ 198 bilhões, o que representa 41,6% do PIB total do setor do agronegócio brasileiro no mesmo ano (ABIEC, 2023).

No entanto, a principal razão que torna os SIPA singulares no quesito de provisão de alimentos está no fato de entregarem alimentos que serão essenciais para diminuição da subnutrição e fome e erradicação de doenças, principalmente em regiões mais pobres do planeta (Johnston *et al.*, 2023; Nelson *et al.*, 2018). Os produtos de origem animal, como a carne e o leite, são alimentos com elevado teor nutricional, vitaminas e aminoácidos essenciais para uma alimentação saudável (McAuliffe *et al.*, 2023). Nesse sentido, quando produzidos em escala apropriada e de acordo com o contexto e os ecossistemas locais, a pecuária desempenha um papel fundamental não só para a segurança alimentar, mas também para a restauração da biodiversidade e mitigação de impactos ambientais da produção de alimentos (Beal *et al.*, 2023).

A literatura aponta os ecossistemas pastoris, incluindo-se naturais e cultivados, como uma estratégia proeminente para o sequestro de carbono no solo, melhoria da produtividade da água e da eficiência de uso de nutrientes (Alves *et al.*, 2019; Herrero *et al.*, 2009). Essa maior eficiência alcançada por esses sistemas, incluindo os integrados, torna-os mais resilientes quanto à adversidades climáticas (Szymczak *et al.*, 2020) e mais hábeis quanto à produção de energia (GJ ha^{-1}) considerando as produtividades do sistema (forragem, animais e grãos) (Farias *et al.*, 2020). Tais evidencias sugerem e confirmam o potencial dos SIPA em promover uma agricultura sustentável e alinhada com as demandas globais futuras (FAO, 2010).

2. CAPÍTULO II

GRAZING MANAGEMENT IN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS FOR SUSTAINABLE FOOD PRODUCTION: BALANCING SOIL CARBON STORAGE AND FOOD SECURITY[1]

[1] Artigo elaborado conforme as normas da revista Nature Food (Apêndice A).

Grazing Management in Integrated Crop-Livestock Systems for Sustainable Food Production: Balancing Soil Carbon Storage and Food Security

Leonardo Dallabrida Mori[a], Vicente José Laamon Pinto Simões[a], Carolina dos Santos Cargnelutti[a], Lóren Pacheco Duarte[a], Gabriela Lima Leal[a], Ana Paula Schwede Doberstein[b], Emerson André Pereira[b], Edicarlos Damascena de Souza[c], Cimélio Bayer[d], Paulo César de Faccio Carvalho[a]*,

[a] Department of Forage Plants and Agrometeorology, Integrated Crop-Livestock System Research Group (GPSIPA), Federal University of Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves Avenue 7712, Porto Alegre, RS 91540-000, Brazil; [b] Support Center for Agrarian Courses, Regional University of Northwestern Rio Grande do Sul, Rua do Comércio Avenue 3000, Ijuí, RS 98700-000, Brazil; [c] Department of Agronomy, Institute of Agricultural Science and Technology, Federal University of Rondonópolis, Estudantes Avenue 5055, Rondonópolis, MT 78736-900, Brazil; [d] Department of Soil Science, Soil Management and Low Carbon Agriculture Research Group (SOMALCA), Federal University of Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves Avenue de7712, Porto Alegre, RS 91540-000, Brazil.

***Corresponding author:**
Paulo César de Faccio Carvalho
E-mail address: paulocfc@ufrgs.br
Postal address:
Av. Bento Gonçalves 7712
Porto Alegre, RS – Brazil
ZIP Code 91540-000

ABSTRACT

Preserving natural resources while producing high-quality food for the world is the duty of the agricultural sector. Our study presents long-term results from experimentation on Integrated Crop-Livestock Systems (ICLS), revealing its productive and environmental benefits. We aimed to assess carbon and nitrogen stocks and their temporal behavior over 22 years and relate them to food provision from these systems. We tested non-grazed cover crops production models and cover crops grazed at high, moderate, and low grazing intensities. Our findings suggest that the implementation of any management approach results in an initial surge in carbon and nitrogen stocks, which eventually stabilizes over the long term, with no discernible differences observed between treatments. Additionally, we found that food provision under well-managed ICLS is increased by 24% in terms of protein, without generating negative impacts on resource utilization. The ICLS proved to be a key strategy for increasing food production while preserving soil carbon stock, with correct pasture management being paramount for gathering these outcomes.

KEYWORDS:
Sustainable intensification, ecosystem services, pasture management, food production, soil carbon storage

1. Introduction

It is projected that approximately 600 million individuals are anticipated to confront the enduring challenge of chronic undernourishment by the year 2030[1]. This scenario poses a formidable defiance, demanding strategies that promote increased food production, growth in per capita income, and the preservation of environmental integrity. In this context, Integrated Crop-Livestock Systems (ICLS) re-emerge not only as an efficient production system but also as a socially beneficial solution, contributing to positive economic outcomes and generating employment opportunities[2]. Additionally, animal-source foods (ASF) resulting from the inclusion of domestic herbivores in specialized cereal crops play a crucial role in improving nutrition, alleviating poverty, and enhancing food security and health[3]. However, there is still a gap in understanding the interplay between food provision and the long-term impacts of grazing animals on soil carbon storage and its temporal behavior.

Although studies on ICLS have demonstrated several advantages in terms of sustainability - including social, economic, and environmental aspects - such systems remain rare as a proportion of global agricultural area[4,5]. One prominent challenge is the requirement for specialized labor to manage the intricate interplay among soil, plants, and animals. Additionally, the persistent notion that animals diminish subsequent crop yields, influencing environmental factors such as soil carbon stock, poses a hurdle. However, there is evidence that grazing does not compromise crop yields[6] and, in some cases, may even increase yields in annual crop-pasture rotations[7]. Furthermore, although ICLS are recognized as significant carbon sinks, many studies only consider the short and medium-term effects on the carbon stock of these systems[8,9]. The IPCC[10] suggests that it takes about 20 years for the soil to reach a new equilibrium state in terms of carbon accumulation after the implementation of a new farming system. Therefore, there is still a significant gap in the literature regarding the long-term (>20 years) behavior of soil carbon stock in ICLS.

Soil carbon storage is undeniably important for mitigating climate change and maintaining soil functions. However, net primary productivity, which reflects the vegetation's carbon sequestration capacity, should not be overlooked as one of the natural carbon sinks[11]. Any alterations in carbon storage within plants or soils bear substantial consequences for atmospheric carbon dioxide levels[12]. In this sense, given that systems with moderate grazing intensity typically exhibit higher net primary productivity compared to ungrazed or overgrazed systems[7,13], it would be imprudent to base conclusions about the potential of these strategies to mitigate climate change solely on soil carbon stocks. This is because the contribution of carbon sequestration by vegetation is often not considered, and neither is the environmental impacts involved[11].

Although there is a natural relationship between vegetation and soil carbon storage, in ICLS, the intrinsic effects of animals drive organic matter mineralization[14]. This implies that, despite the greater additions of residues (vegetal and animal) in grazed areas, there is a faster conversion of organic residues into primary production. This characteristic can even out the carbon sequestration in the soil between grazed and ungrazed areas in the long term, as only a common fraction remains in both areas[15]. Additionally, in the context of conservationist systems with high productivity, soil carbon stocks seem incapable of registering the negative impacts of high grazing intensities. Under no-till, cropping systems require annual additions of 10 - 12 Mg dry matter (DM) ha^{-1} to maintain or increase soil carbon stocks[16]. In this sense, ICLS under no-till, in response to nitrogen fertilization, can still provide the necessary carbon input to maintain or increase these stocks in the soil even at high grazing intensities[17].

Acknowledging this, the potential of a farming system to provide solutions for climate change is not exclusively tied to its capability for carbon sequestration in the soil. Equally crucial is the system's ability to contribute to food security while concurrently preserving carbon storage. In this study, we leveraged a comprehensive database from a long-term experiment situated in Southern Brazil. The objective was to evaluate soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) stocks in an ICLS subjected to a range of grazing intensities, as well as a Pure Cropping System (PCS) without grazing effect. Our analysis spans a period of 22 years, allowing us to delineate the behavior of these systems and assess their long-term impact on primary production and food provision. We examined the primary production of both crop and pasture phases and connected them to nutrient use efficiencies and water productivity. To

provide secure information about food production from different management options, we used human-digestible protein (HDP) and energy production (E) to compare the systems.
We hypothesized that ICLS under different grazing intensities and PCS with ungrazed (UG) cover crops, both under no-till, have similar soil carbon and nitrogen stocks. Additionally, we posit that the increased food provision in ICLS with low and moderate grazing intensities is not related with soil carbon stock.

2. Results

2.1. Soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) stocks

No significant effects were observed from the interaction between pasture management and the years of evaluation on SOC (Figure 1a) and a similar trend was noted for TN (not shown). Moreover, across all analyzed years, grazing intensity and the presence or absence of animals did not show any discernible interference in SOC and TN stocks. However, when the years were considered individually, a temporal behavior became evident, specifically between the years 2001 and 2004 for SOC and TN (Figure 1b, c), these results are in accordance with the carbon inputs by total herbage production (THP) (p < 0,05) (Figure 1d). At the beginning of the experiment, the SOC and TN presented initial stocks of 47.8 and 4.39 Mg ha^{-1}, respectively. Subsequently, these values increased to 51.7 and 4,73 Mg ha^{-1} in 2004, with the higher levels persisting in the subsequent two years of sampling (51.0 and 4.43 Mg ha^{-1} for 2014 and 52.0 and 4.44 Mg ha^{-1} for 2023).

The increase in SOC and TN stocks three years from the beginning of the experimental protocol is associated with higher C inputs (2975 to 4425 kg ha^{-1}, from 2001 to 2004), as well described by the THP (Figure 1d). This increase was influenced by nitrogen fertilization (refer to Table 1), which was initiated concurrently with the installation of treatments. This marks an unique operational procedure compared to the preceding years of the experiment, considering that both the presence and absence of animals did not interfere with these variables. After the initial phase of the protocol, SOC and TN stabilized at higher values than at the beginning, and the C input seems to have little influence on these variables. Even higher than the first year, the C input by THP decreased in the last year of evaluation (3656 kg ha^{-1}) compared with the previous (2004 and 2014), due to lower N fertilization rates (Table 1), to a substantial reduction in rainfall in the preceding years from the sampling (Figure 4), and the change of cover crops, transitioning to solely Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) (see Methods).

Graphs e and f (Figure 1) depict SOC and TN values obtained in 2023 at a soil depth of 1 meter, divided into eight layers. The same trends observed in the upper layer (0 – 20 cm) were consistent 22 years after the treatment installation for the entire soil profile. Grazing intensity and the absence of grazing did not significantly influence either variable, with values ranging from 151.6 to 174.2 Mg ha^{-1} for SOC and from 12.1 to 12.8 Mg ha^{-1} for TN. Similarly, the evaluated layers did not exhibit any significant difference in SOC and TN stocks. Regarding the C input by THP for the preceding year of soil sampling, the treatments also did not differ, values ranging from 3367 to 3823 kg ha^{-1} (Figure 1g).

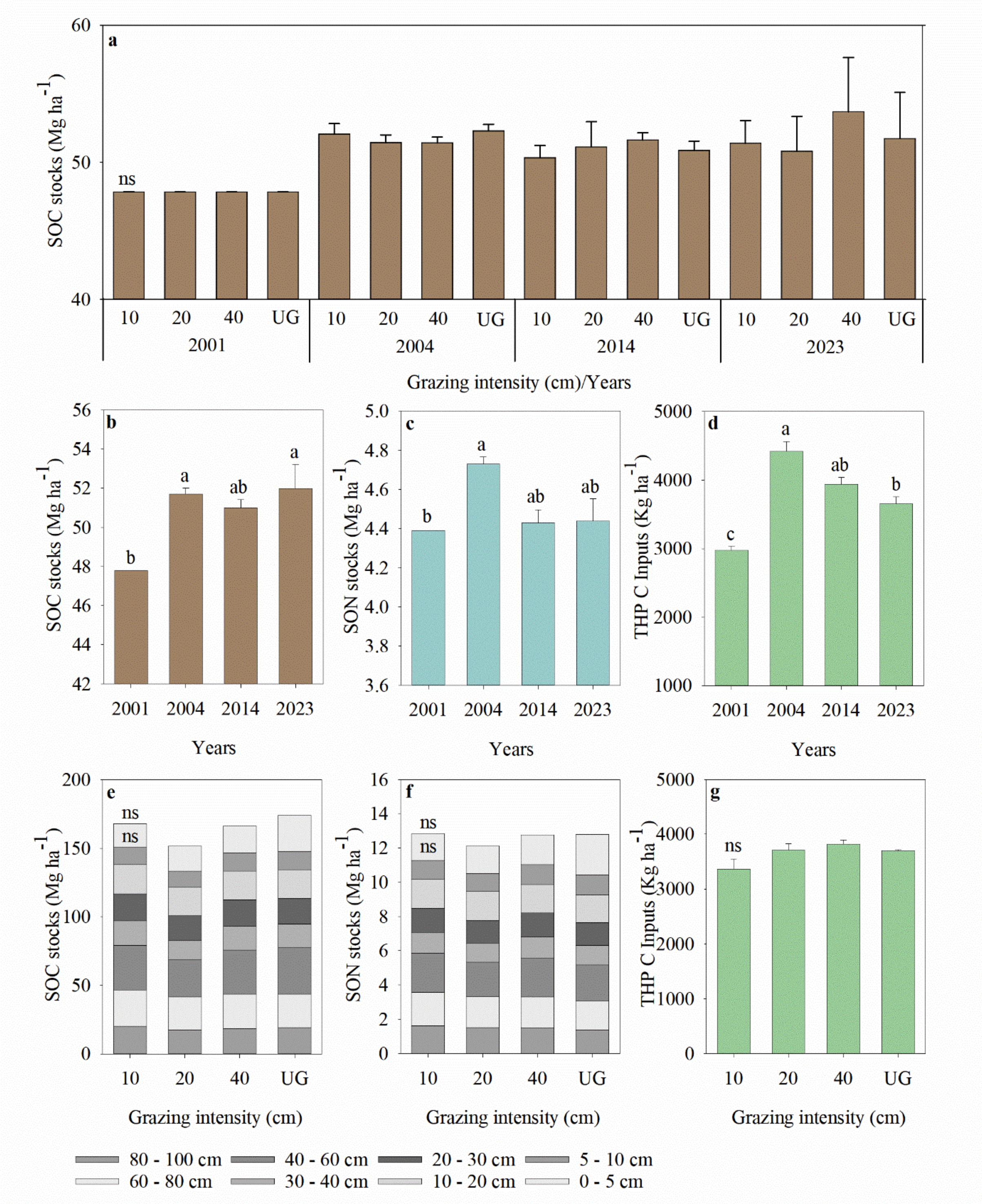

Figure 1 | Soil carbon and nitrogen stocks and carbon inputs by total herbage production. **a** Soil organic carbon stocks (SOC) across all treatments; **b** and **c** SOC and total nitrogen (TN) stocks across years at a depth of 0 – 20 cm; **d** carbon inputs from the total herbage production (THP C Inputs) for the four years preceding soil sampling; **e** and **f** SOC and TN after 22 years (2023) of experimentation at a depth of 0 – 100 cm considering eight layers; **g** carbon inputs from the total herbage production (THP C Inputs) for the treatments after 22 years. In **a-d** and

g, error bars in each column represent the standard error of the whole data of each variable. In **a** and **e-g,** “ns” means that treatments were not significant. Means followed by the same letters do not differ according to Tukey’s test at $p \leq 0.05$. Treatments consisted of an integrated crop-livestock system (ICLS) under three grazing intensities (10, 20, and 40 cm of pasture height) and a pure crop system (PCS) ungrazed (UG).

2.2. Primary production, nutrient use efficiency index, and water productivity

Grazing intensity proved to be a crucial factor in all production parameters evaluated in the system. While, for the most of analyzed variables, the moderated and low grazing intensity (20 and 40 cm) did not exhibit significant differences compared to the ungrazed treatment, the high grazing intensity (10 cm) presented the lower results for all of them (Figure 2). This evidence underscores the central role of pasture management in ICLS. Concerning soybean yield (Figure 2a), low grazing intensity presented the highest yield (3005 kg ha^{-1}), not differing significantly from moderated grazing intensity and absence of grazing (2879 and 2873 kg ha^{-1}, respectively). However, all these treatments showed significant differences compared to high grazing intensity (2712 kg ha^{-1}). A similar pattern was observed for pasture production (Figure 2b), where the best THP was achieved by low and moderated grazing intensities and ungrazed treatment (7502, 7008, and 6868 kg DM ha^{-1}, respectively), while the lowest forage production was recorded under high grazing intensity (6202 kg DM ha^{-1}).

The superior results in soybean and pasture production under low and moderate grazing intensity, along with the ungrazed treatment, are closely associated to the highest nutrient use efficiency (Figures 2c, d, e, f, g, h). For all nutrients, low grazing intensity exhibited the highest use efficiency, not significantly differing from moderate grazing intensity and the ungrazed treatment, for both system’s phase production. On the other hand, high grazing intensity exhibits significantly lowest values from all nutrient use efficiency for soybean and N use efficiency for pasture. For pasture P and K use efficiency, this treatment had statistically similar results only to the ungrazed treatment but differing from low and moderated grazing (Figures 2d, f).

Regarding water productivity (Figures 2i, j), the impact of the presence or absence of animals and pasture management is even more pronounced for soybean yield. Low grazing intensity presented the highest result, not differing only from UG. Moderated grazing intensity had a significant difference from low grazing, showing a close result to UG. Lastly, intensive grazing (10 cm) was the least effective management ($p \leq 0.05$) for this variable. For pasture production the results point out high grazing intensity as detrimental management to the use efficiency of water, being significantly different from low and moderated grazing intensities. The ungrazed treatment presented an intermediate result, not differing from the grazing managements.

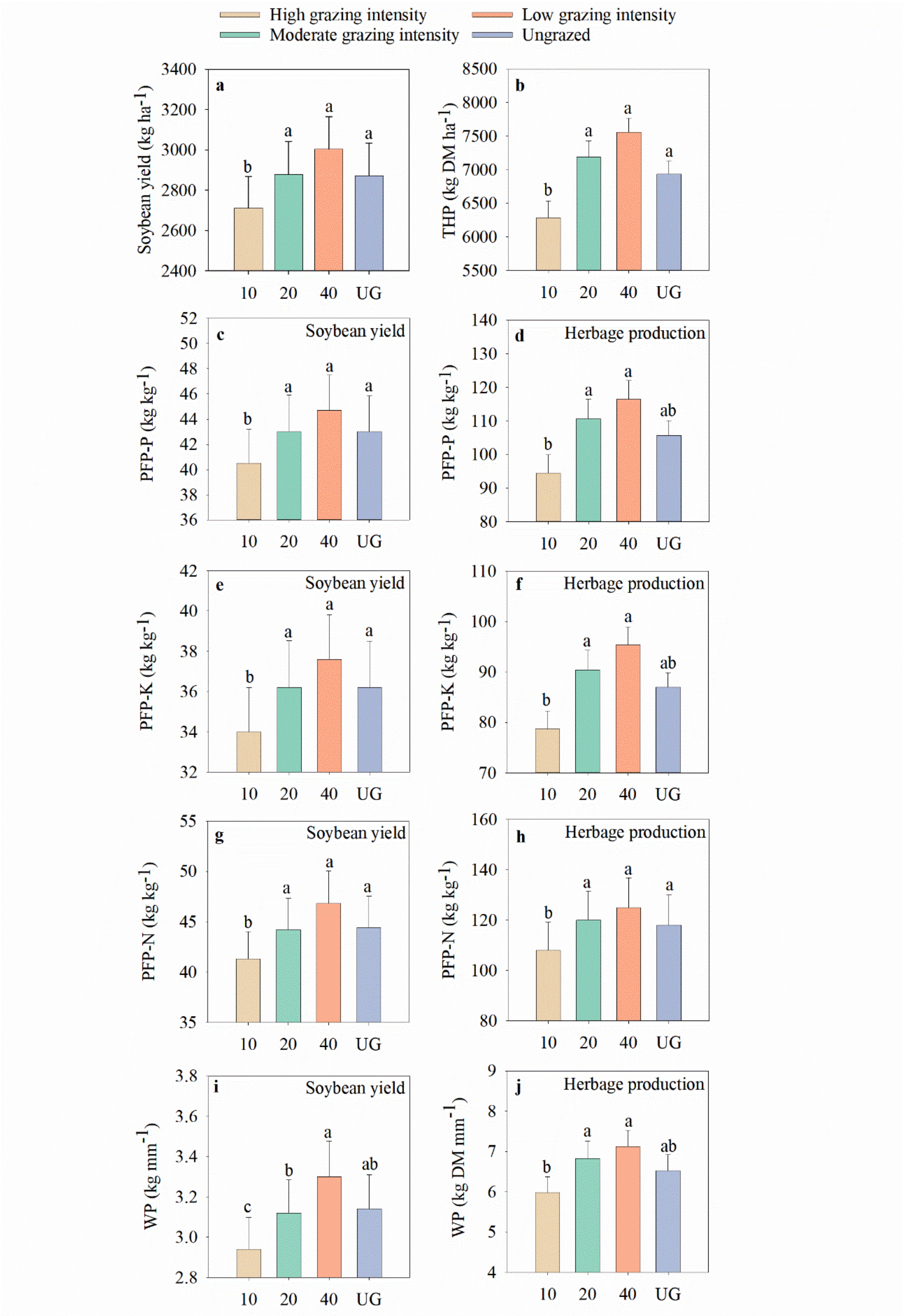

Figure 2 | Primary productivity and system's efficiency indicators. a Soybean yield; **b** total herbage production; **c-h** partial factor productivity for P, K, and N for crop and pasture phase; **i** and **j** water productivity for crop and pasture phase. In **a-j,** error bars in each column represent the standard error of the whole data of each variable. Means followed by the same letters do not differ according to Tukey's test at $p \leq 0.05$. Treatments consisted of an integrated crop-livestock system (ICLS) under three grazing intensities (10, 20, and 40 cm of pasture height) and a pure crop system (PCS) ungrazed (UG).

2.3. *Protein and energy production*

The conversion of primary and secondary productivity into a single variable is a useful method for analyzing farming systems. In our study, the HDP and E exhibited distinct traits: the former indicates the amount of food directly available to human consumption, while the latter exhibits the potential of the system in resource utilization and transformation. Both variables showed significant differences among the treatments. The HDP distinguished ICLS from PCS regarding the amount of food that can be delivered through their adoption, while the E not only confirmed the superiority of ICLS due its higher resource use efficiency, but also underscored the essential nature of pasture management for achieving better results.

Our results indicate that ICLS offer a viable solution to enhance the provision of ecosystem services associated with food production without compromising soil carbon and nitrogen stocks (Figure 1). Notably, pasture management emerged as a crucial factor in achieving superior outcomes when considering the holistic benefits of the entire system. Figure 3a shows the total HDP delivered by the systems after completing a full cycle of pasture and crop phases. The data establishes that by adding the animals and increasing grazing intensity result in a continuous augmentation of the food yield. All treatments showed significant differences, with 10 cm of pasture height yielding the highest result (1009 kg ha^{-1}), followed by 20 cm (965 kg ha^{-1}), 40 cm (895 kg ha^{-1}), and the ungrazed treatment showing the lowest result (778 kg ha^{-1}).

Figure 3b shows only the HDP gain obtained during the pasture phase of the system, disregarding the initial cattle weight. The findings suggest that low and moderate grazing intensities exhibit greater efficiency in harnessing pasture resources to yield high-quality food, resulting in the highest values (839 and 836 kg ha^{-1}, respectively). The high grazing intensity did not differ (808 kg ha-1) from the previous and from the ungrazed treatment, which had the least favorable outcome (778 kg ha-1), distinctly differing from the observed results with low and moderated grazing intensities. The difference between the first two graphs is mainly because the total HDP of high grazing intensity is obtained through an elevated stocking rate, needed to maintain the targeted pasture height. On the other hand, the better HDP gain (Figure

3b) of well-managed pastures is obtained through an optimal adjustment of grazing intensity allowing greater individual live weight gain (LWG).

Concerning energy production, ICLS showed a significant difference when the pasture was managed under low and moderate grazing intensity (Figure 3c). These two treatments presented the highest values to the analyzed variable confirming the efficiency of the system when the animal component is added under well-managed pastures (180 GJ ha^{-1} for low grazing and 171 GJ ha^{-1} for moderated grazing). High grazing intensity, conversely, presented a lower result in terms of energy compared to the other grazing treatments (150 GJ ha^{-1}), a phenomenon explained by its diminished primary production in terms of soybean grain and herbage mass (Figure 2a, b). Finally, the PCS presented a statistical similarity to the high grazing intensity, even with the lowest E production (138 GJ ha^{-1}) mainly due to the absence of animals and their E contribution.

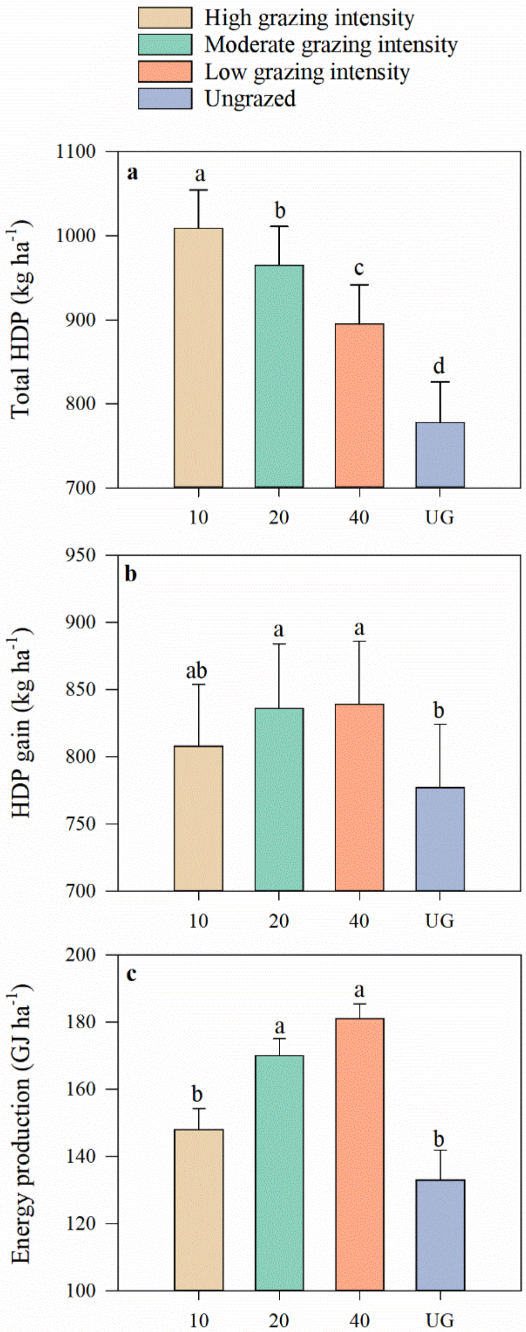

Figure 3 | Food provision and energy production. a Total human-digestible protein; **b** human-digestible protein gain; **c** energy production. In **a-c,** error bars in each column represent the standard error of the whole data of each variable. Means followed by the same letters do not differ according to Tukey's test at $p \leq 0.05$. Treatments consisted of an integrated crop-livestock system (ICLS) under three grazing intensities (10, 20, and 40 cm of pasture height) and a pure crop system (PCS) ungrazed (UG).

3. Discussion

Over a span of 22 continuous years of field experimentation, our findings resoundingly affirm the substantial positive impact wielded by ICLS, particularly when subjected to optimal grazing intensity. The results obtained highlight important information such as: a) soil carbon and nitrogen stocks are not influenced by grazing intensity and the presence or absence of animals considering the particular characteristics from our study; b) the combined use of ICLS and moderated grazing intensity in the pasture phase provide the best relationship between food production and environmental sustainability; c) although ICLS and ungrazed areas show similar efficiency in nutrient and water use for primary production, ICLS under moderate and low grazing intensities demonstrate a clear superiority in their potential for resource utilization and transformation for energy production; and d) under moderate grazing intensity, ICLS can achieve a 24% increase in food provision, specifically in terms of protein production.

In general, evidences not only highlights the heightened efficacy of ICLS in delivering essential ecosystem services[18] but distinctly underscores its transformative role in bolstering food provision while maintaining soil carbon accumulation. The Southern region of Brazil dedicates a substantial 18.7 million ha to summer grain crops, contrasting starkly with the mere 3.7 million ha allocated for winter crop cultivation[19]. This glaring 15 million ha differential is predominantly utilized for suboptimal practices, including, at best, ungrazed cover crops with high forage value, poorly managed pastures, or, quite often, left fallow. The strategic inclusion of grazing herbivores under moderate grazing intensity in these underutilized areas could unlock an additional of 24% in food production, encompassing direct protein meat and soybean yields.

The increase in food production observed in this study is not only significant when compared to previous research[20] but represents more importance due to the provision of animal-source foods. This is noteworthy as this kind of food boasts higher concentrations of indispensable amino acids compared to major foods consumed globally[21]. Rather than focusing solely on producing more, it is crucial to deliver high-quality and nutritious food. Products of animal origin emerge as crucial sources of micronutrients and vitamins (e.g., iron, zinc, folate, selenium, choline, and vitamins A and B)[22], and will play a significant role in addressing nutrient gaps in the global population by 2050[22,23]. The absence or deficiency of essential nutrients not only contributes to nutritional complications[22] but can also result in additional deaths and illnesses from iron deficiency anemia, sarcopenia, and child and maternal malnutrition[24]. Moreover, the economic and environmental costs associated with the treatment of these diseases can be more pronounced than the impacts attributed to livestock[25,26]. Indeed, assessments of the environmental impacts of livestock are often oversimplified[27].

More critical than sheer productivity is the system's capacity to direct this yield toward sustainable intensification by conserving carbon and nitrogen stocks in the soil. An extensive body of literature explores systems capable of sequestering carbon[20,28–30] or even depleting stored carbon[31]. Thus, it is widely understood that the effects of systems on this variable are highly context-specific. Climate conditions, especially precipitation, soil type and texture, plant species and metabolism, cultivation practices, nutrient management, and grazing intensity are among the myriad factors influencing a system's impact on carbon stocks in the soil[32]. In our study, the integration of herbivores within cropping systems is responsible for catalyzing nutrient cycling[33], explaining the system's improved production capacity while conserving natural resources through the decoupling-recoupling processes between nitrogen and carbon[34].

Grazing animals play an active role in nutrient cycling, contributing significantly to soil fertility maintenance[33]. This biogeochemical process is catalyzed by their consumption of pasture-derived feed, which has low nutritional value for humans but is transformed into high-quality biological products such as meat or milk, along with waste products like feces and urine. These animal-generated residues are returned to the soil, containing a substantial portion of essential chemical elements crucial for plant growth[35], mineralized into readily available and easily accessible forms. Furthermore, this nutrient cycling alters the spatial distribution of nutrients in the area and their availability to plants[18], allowing vegetation to reuse the same nutrients within a single grazing season resulting in a higher production of biomass that begins the cycle again. Consequently, this effect explains how ICLS can enhance food provision in the same area without compromising soil carbon stocks, as nutrient recycling occurs more slowly in non-grazed areas.

Incorporating herbivores into arable cropping systems is accountable for various ecosystem services across all categories—provisioning, supporting, regulating, and cultural[18]. This association benefits the system by enhancing soil quality, biodiversity, weed control, and water management, while also promoting carbon sequestration and reducing the need for agrochemicals[33,36]. Our findings on soil carbon and nitrogen stocks are also aligned with this existing literature. Importantly, our study elucidates, for the first time, the temporal behavior of these elements (C and N) in the soil over an extended utilization period of 22 years in ICLS and PCS. Even though both systems under different grazing management presented the same behavior, the maintenance of these elements in the soil is already characterized as a pronounced environmental benefit.

The carbon and nitrogen cycles are strongly interconnected in soil due to the elemental stoichiometry of plant autotrophy and soil microbial heterotrophy[34]. Carbon accumulation is linked to adequate nitrogen input, which plays an essential role in stimulating vegetation and increasing the flow of carbon from the atmosphere to the soil through photosynthesis fixation. Our data demonstrate that the primary factor contributing to the increase in soil carbon stock in the initial period of experimentation is the regularization of nitrogen inputs through fertilization. Before the protocol was installed, the area was maintained with ungrazed temperate cover crops without nitrogen fertilization. However, at the start of the experiment, all treatments began to receive this input (Table 1). This explains why the same effect was observed regardless of the presence or absence of animals and the applied grazing intensity. Furthermore, our results underscore the significance of adequately supplying this nutrient to the soil. In addition to enhancing productivity in pasture systems, it contributes to an improvement in soil carbon stock, even when temperate crops are solely utilized as a soil cover.

Soil organic carbon sequestration hinges on two primary factors: the inputs of organic material, primarily derived from photosynthesis, and the outputs of carbon through respiration processes, which serve as an energy source. In Southern Brazil, ungrazed systems need 10 – 12 Mg DM ha^{-1} of annual additions to maintain or increase carbon stocks under no-tillage[16]. When considering inputs from THP, which better represent the full extent of canopy dynamics in ICLS[37], and the soybean shoot dry matter addition in the same experiment[38], even the highest grazing intensity is capable of achieving these requirements. Insights gleaned from extensive 70-year experiments demonstrate that employing grass or a combination of grass and clover can elevate soil carbon levels, albeit for a finite duration until a new equilibrium for SOC is attained, and only while the C inputs are maintained[39]. Our results illustrate a similar pattern, suggesting that the studied systems have reached a *quasi-equilibrium* where the gains facilitated by the carbon inputs are equivalent to the losses[15]. This also suggests that there exist different factors beyond soil carbon stocks influencing well-managed ICLS driving higher productivity.

Previous studies within the same experimental protocol have demonstrated that moderate grazing intensities increase particulate organic carbon and nitrogen, which serve as an energy source for soil microorganisms[38]. It is also established, based on the same treatments, that residue cycling under moderate grazing conditions leads to more pronounced nitrogen fluxes and nutrient release[40]. The accelerated decomposition of residues under this grazing intensity is attributed to morphophysiological modifications in the pasture, resulting from constant resprouting[41]. This phenomenon influences both the passage time of food through the cattle digestive system, due to lower lignin content, and the rapid release of nitrogen[40]. Grazing herbivores act as decoupling agents of carbon and nitrogen through the digestive process, liberating these elements separately into the pasture. However, under high grazing intensities, the decoupling surpasses the coupling process performed by plants through photosynthesis[34]. This effect explains why, under moderate grazing intensity, ICLS achieved greater primary production, while in intensive management nutrient losses can contribute to air pollution through CH_4 emission[17] and soil contamination by N leaching.

The superior yields obtained in primary production of well-managed pastures in our study reinforce previous findings highlighting the advantageous impact of animal inclusion in grain systems[7,13,42]. These improved results in both system phases (pasture and crop) were attributed to the higher soil structure quality achieved by the use of ICLS[7]. Therefore, the notable difference observed with high grazing intensity emphasizes the pivotal role of pasture management in realizing these benefits. Considering this, we can hypothesize that this grazing intensity is detrimental to soil quality, resulting in poorer production. This effect is also explained by the lowest nutrient use efficiency and water productivity obtained under intensive pasture management. Thus even if the positive impact of incorporating animals into the system has been emphasized several times, benefiting both the production system and the nutrient use efficiency[7,43,44], we posit that these favorable outcomes are dependent on pasture management.

Our research findings regarding HDP strongly suggest that ICLS serve as an important asset in achieving food security. The inclusion of animals on specialized grain systems linearly augments the total HDP according to the increase in grazing intensity. However, normally, animals submitted to high grazing intensities have low carcass weight and quality[45], which can make difficult its commercialization at the end of the pasture phase, given that the greater HDP resulted from the higher stocking rate. Besides, under this management, the animals change their food strategy, spending more time grazing and reducing rumination time[46], which can contribute to soil compaction through trampling. Prior studies have also emphasized that excessive grazing intensification heightens the system's susceptibility to environmental fluctuations, such as hydric deficits[6]. This is in accordance with our E results, showing that by increasing grazing intensity the system becomes less efficient in using environmental resources and producing energy.

On the other hand, the grazing range between moderate and low grazing intensities represents the best results in terms of individual gains and by area[17,45]. Even though the total HDP being smaller in these pasture management, they represent the better gains in terms of protein during the grazing period and provide animals with a good score for slaughter[45]. Additionally, they proved to be more efficient in utilizing natural resources (nutrients and water) through the better E delivered to the system. This efficiency is primarily attributed to the influence of animals on herbage production within pastures. Grazing facilitates a constant renewal of leaves and tillers, leading to a higher THP at the end of the pasture phase[47]. Additionally, herbivores play a crucial role in converting plant organic nutrients into inorganic nutrients during the digestion process, providing a source of labile nutrients suitable for microbial biomass and rapid regrowth of the plant community. All these effects confirm why well-managed ICLS exhibit superior land-use efficiency[48].

Concerning ungrazed systems used only as land cover for the next grain crop, what is perceived is an underutilization of resources, resulting in lower HDP and E production. This discrepancy arises in the fact that the income derived from cattle in terms of protein is sourced from grasslands that are not directly suitable for human consumption[49], and therefore these pastures maintained only as cover crops do not generate any benefit in terms of food production in the period that comprises the majority of the year. This underlines the importance of developing sustainable systems capable of promoting ASF production to meet the current and future demands of humanity for high-quality and nutritious food[50]. Both variables also reaffirm the importance of ICLS under well-managed pastures as a key strategy for ecological intensification[51].

In current literature, much attention has been focused on long-term carbon stabilization or the stock of organic matter in the soil profile. The vegetation's ability to sequester carbon often does not receive due attention in discussions about climate change mitigation. However, vegetation, as an essential component of terrestrial ecosystems, plays a fundamental role in regulating the carbon cycle and providing food. Therefore, it is essential that, in the context of sustainability, future studies not only focus on the quantity of carbon stored in the soil but also consider the potential of net primary production and food provision.

This study has the potential to inform policymakers about the integration of grazing herbivores in grain crops, highlighting its capacity to deliver high food production while concurrently promoting environmental protection. This can support action strategies that seek to improve the productive indices of farms, generating results at both an economic, social, and environmental level. Finally, the implementation of grazing management in ICLS can help to secure the future of humanity's needs for high-quality food without collaborating for negative environmental impacts.

4. Methods

4.1. Experimental site

The research was conducted at a long-term experimental protocol established at the Espinilho Farm in 2001, located in the municipality of São Miguel das Missões, Rio Grande do Sul state, Southern Brazil. The experimental field is situated at 418 meters above sea level, at coordinates 28º56'10" S and 54º20'50" W. The geomorphological unit corresponds to the Planalto Médio region, where livestock production has a significant tradition, and grain crop production has shown substantial growth in recent decades.

The native vegetation of the area comprised the characteristic grasslands of the Pampa biome. Since 1993, the land has been managed as no-till soybean (*Glycine max* (L.)) cropland during the warmer season (October to April) and black oat (*Avena strigosa* Schreb.) as a cover crop during the colder season (May to September). In 2001, the area was designated for an experimental protocol involving an integrated soybean-beef cattle annual rotation, including a mixture of black oat and Italian ryegrass pastures, which is a typical ICLS in southern Brazil[52]. After 2017, the pasture composition transitioned to solely Italian ryegrass. Production data were gathered from the experiment's long-term database (years 2001 to 2023), excluding years with missing data for soybean (2007, 2009, 2012) and pasture (2007, 2009, 2012, 2020) production. The SOC and TN data were collected in four evaluations in the years of 2001[53], 2004[53], 2014[54] and, 2023.

4.2. Treatments and experimental design

The experiment was established as a randomized complete block design with three replicates. Treatments initially consisted of four grazing intensities defined by different sward heights of mixed black oat and annual ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.). Shortly after the initial design, two plots were assigned to blocks one and two to work as an ungrazed control treatment, making the experimental design unbalanced. The experiment has an area of 16.6 hectares (ha), which was divided into 9 paddocks (experimental units), with sizes ranging between 1.1 and 3.6 ha each, plus 2 ungrazed (UG) plots with 0.1 ha each. The production system was an ICLS involving a soybean crop phase and a winter pasture phase grazed by cattle (*Bos taurus*) under three grazing intensities, defined by contrasting sward heights under continuous stocking (10, 20, and 40 cm), and an ungrazed control with the same pasture specie used as winter cover crop, defined as a pure cropping system (PCS). The size variation between paddocks aims to reduce the number of animals needed to maintain management target heights, especially in high grazing intensity where a higher stocking rate is required.

4.3. Soil and climate characteristics

The soil in the experimental area was classified as a clayey Oxisol[55], with 540, 270, and 190 g kg^{-1} of clay, silt, and sand, respectively, in the 0 - 20 cm soil layer. The soil profile is deep and well-drained, and the relief is wavy to gently wavy (0,02 to 0,10 m m^{-1}). The soil fertility management in the protocol followed the technical recommendations for the region based on soil analyses[56]. Table 1 outlines the fertilization rates during the years of data collection. Nitrogen application took place 45 days after the pasture establishment, while phosphorus and potassium were applied at the soybean sowing date.

Table 1. Yearly description of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization rates in the long-term ICLS experiment under no-till in Brazilian subtropics. São Miguel da Missões/RS/Brazil.

Year	Nitrogen	Phosphorus	Potassium
	N	P_2O_5	K_2O
2001	45	120	90
2002	60	60	60
2003	90	60	90
2004	45	60	90
2005	45	60	90
2006	45	60	90
2009	90	60	70
2010	90	60	70
2011	90	60	70
2013	140	60	60
2014	140	60	90
2015	90	45	60
2016	112.5	60	90
2017	80	110	100
2018	80	85	85
2019	48	105	100
2020	48	90	90
2021	48	90	90
2022	20	60	80

The climate's region is classified as Cfa according to the Köppen classification system[57], with a warm humid summer. The annual average temperature is 20.7 ºC, and precipitation is 1989 mm[58]. Figure 4 illustrates the yearly precipitation for the database used. The average precipitation was 2064 mm, closely aligning with the region. Throughout the years utilized in our database, 2011 and 2022 experienced severe hydrological deficits during the crop phase of the experiment, while 2020 faced challenges during the pasture phase (the year with the lowest total precipitation).

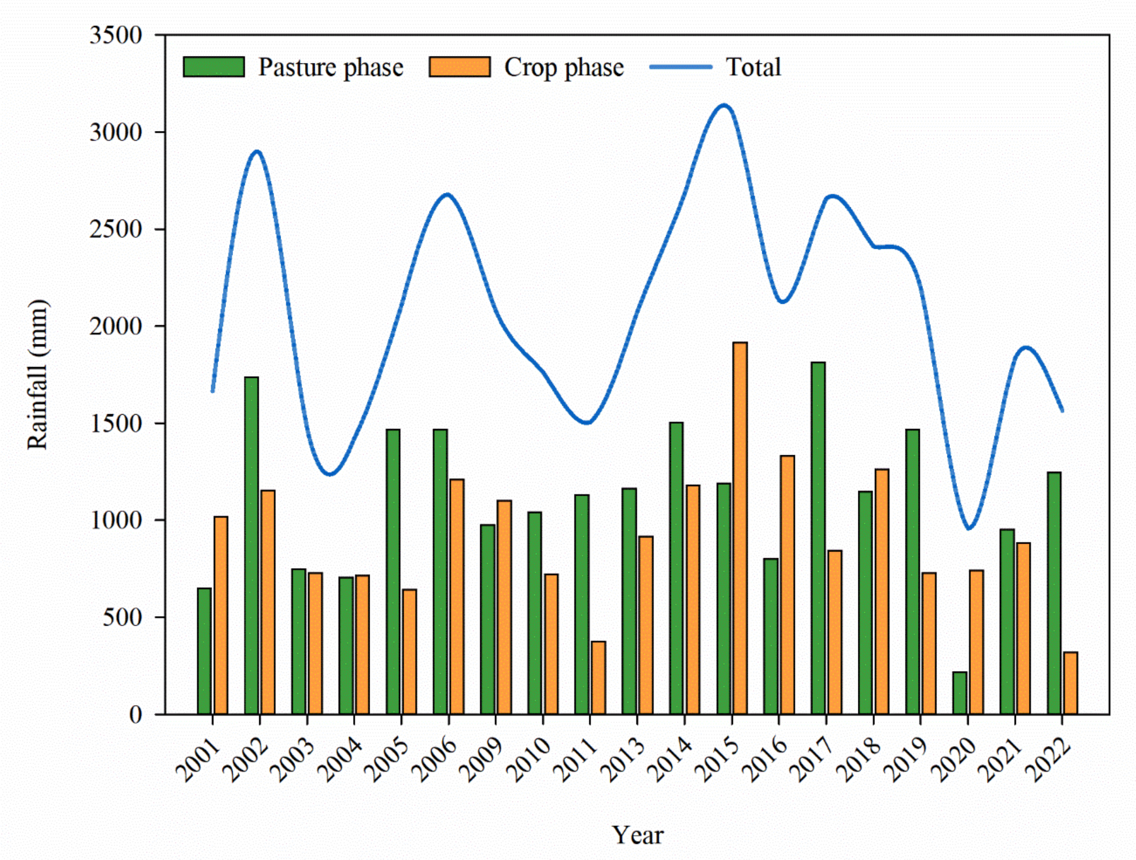

Figure 4 | Annual precipitation. Pasture and crop annual precipitation during the 19 years of data collection and analysis in the long-term ICLS experiment under no-till in Brazilian subtropics. São Miguel da Missões/RS/Brazil.

4.4. Management of cropping phases

4.4.1. Pasture phase management

The pasture phase commenced immediately after the soybean harvest and extended throughout the autumn-winter period, spanning from May to October/November, across all years of the experiment. The pasture establishment involved the broadcast seeding of ~25 kg of viable pure Italian ryegrass seeds per hectare into the existing volunteer ryegrass sward from the preceding winter, naturally re-seeded, aiming to guarantee the successful establishment of the specie in all treatments. Fertilization involved the application of nitrogen (rates in Table 1), 45 days after pasture establishment. The ungrazed areas also received nitrogen fertilization and was maintained as a cover crop throughout the pasture phase. Conversely, the ICLS paddocks provided forage for crossbred Angus x Hereford x Nelore steers, averaging an initial weight of 200 kg and an age of 12 months.

Each paddock received three tester animals that remained throughout the stocking period, along with a variable number of put-and-take animals[59] periodically adjusted to maintain the target sward heights. Tester animals were weighed both at the beginning and end of the pasture phase, while put-and-take animals were weighed every time they added or removed from the paddocks to adjust the animal load. Sward height monitoring was conducted bi-weekly by measuring 100 random points per experimental unit using a sward stick[60] to ensure that the average sward heights closely matched the pre-established target heights. The grazing period extended from June/July to October/November across all years of the protocol, with an average duration of 120 days.

4.4.2. Soybean phase management

The soybean crop phase started after the desiccation of the pasture to all years of protocol. The sowing occurred between the middle of November and the beginning of December using the most adapted cultivars to the region following the agronomic recommendations. Seeds were inoculated with *Bradyrhizobium* inoculants and sown using a no-till seed drill with 45 cm between rows aiming at a density of 255.000 plants per hectare. Fertilization rates were determined each year aiming at a yield of 4.000 kg of grains per hectare (Table 1). Crop growth was monitored weekly to control pests and diseases, and whenever necessary, applications of chemicals (herbicides, insecticides, and fungicides) were carried out based on technical recommendations for each product. The soybean harvest occurred between April and May.

4.5. Soil sampling

Soil sampling for carbon and nitrogen stocks determination were conducted in four different years across the experiment period (2001 to 2023): in May 2001 previous to protocol installation[53], in May 2004 three years after the protocol establishment[53], in April 2014 tem years after the second determination (and thirteen years from the protocol installation)[54], and in May 2023 after twenty-two years from the beginning of the experiment. The examined soil depth was 20 cm in the first three samplings and 100 cm in the last one, and the soil layers varied for each collection. For the first two samplings, the soil layers were 0 – 2.5; 2.5 – 5; 5 – 7.5; 7.5 – 10; 10 – 15; and 15 – 20 cm. In 2014, the layers changed to 0 – 5; 5 – 10; 10 – 15; and 15 – 20 cm, and, finally, in 2023, they were 0 – 5; 5 – 10; 10 – 20; 20 – 30; 30 – 40; 40 –

60; 60 – 80; and 80 – 100 cm. The samples were homogenized in a bucket, placed in plastic bags with proper identification, and dispatched for laboratory analyses. Undisturbed soil samples were collected in 2023 at corresponding depths for soil bulk density determination[61].

The disturbed samples, collected for the determination of C and N concentration, underwent an air-drying process at 40°C and were subsequently ground to pass through a 2 mm sieve using a soil mill. Following this, a subsample of approximately 20 g, approximately, was placed into a metal cylinder with an iron crescent, covered, and positioned on a constant rotation table for 30 minutes. The soil obtained from this procedure was then sieved to a particle size of 250 µm and ~ 0,6 g was subjected to the analysis of total organic carbon and nitrogen content through dry combustion (Shimadzu VCSH).

4.6. Soil organic carbon and nitrogen stocks calculations

Soil organic carbon and nitrogen stocks were calculated using equivalent soil masses[62], which considers uniform soil masses across treatments and years. The soil mass of the UG treatment from soil sampling of 2023 served as the reference treatment for all evaluation years and the stocks of each sampled layer were summed. Element concentrations (g kg^{-1}) were obtained directly from the analyzer. Soil masses were determined utilizing soil bulk density according to Eq. 1. The procedure for determining the equivalent soil layer involved two main steps: (i) an additional thickness was calculated based on the mass of the reference treatment, which was then added or subtracted off the respective layer depending on whether the soil mass was greater or smaller than the reference (Eq. 2); (ii) carbon and nitrogen stocks were calculated taking into account the element concentration, soil bulk density, thickness of the layer, and the additional thickness (Eq. 3).

$$M_{soil} = BD \times T \times 10{,}000\ m^2\ ha^{-1} \quad \text{(Eq. 1)}$$

$$T_{add} = \frac{(M_{ref-}\ M_{layer}) \times 0.0001\ ha\ m^{-2}}{BD} \quad \text{(Eq. 2)}$$

$$S_{element} = conc \times BD \times (T\ \pm T_{add}) \times 10{,}000\ m^2\ ha^{-1} \times 0.001\ Mg\ kg^{-1} \quad \text{(Eq. 3)}$$

where M_{soil} is the soil mass per unit area (Mg ha^{-1}); BD is soil bulk density (Mg m^{-3}); T is the thickness of soil layer (m); T_{add} is additional thickness of layer (m); M_{ref} is the soil mass of the reference treatment (Mg ha^{-1}); M_{layer} is the soil mass of the current layer (Mg ha^{-1}); $S_{element}$ is the soil stock of element (C) (Mg ha^{-1}); conc is the element concentration (g kg^{-1}).

4.7. Primary and secondary production assessments

Pasture evaluations were conducted at 28-day intervals, yielding the following variables: herbage mass (HM) (kg DM ha^{-1}), daily herbage accumulation rate (DHAR) (kg DM ha^{-1} day^{-1}), and, at the end of the grazing period, the residual biomass (RB) (kg DM ha^{-1}). DHAR was used to calculate the THP (kg DM ha^{-1}), which consisted of the sum of the initial herbage mass and the herbage accumulation between each evaluation. The THP was used as a reference to calculate the annual C inputs to the system, assuming a 45% C content in the dry matter, obtained in the same experimental protocol[38]. Animal performance was assessed through the stocking rate (SR) [kg live weight (LW) ha^{-1}], average daily gain (ADG) (kg LW $animal^{-1}$ day^{-1}), and LWG per hectare (kg LW ha^{-1}). Detailed descriptions of the methodologies and calculations can be found in previous studies developed in the same experiment[6,13]. Soybean yield was assessed at a full grain maturity with 13% moisture content, during the final stage of the crop. Five random subsamples, each one linear meter in length, were collected from all paddocks. The grains were obtained through mechanized threshing, and weight, and then extrapolated to kg of grains per hectare.

4.8. Nutrient use efficiency of N, P, and K fertilization and water productivity

The nutrient use efficiency of N, P, and K fertilization was evaluated using an index that estimates the productive potential of systems as a function of nutrient input[63]. The partial factor productivity (PFP) was determined for the pasture phase (THP, kg DM ha^{-1}) and crop phase (soybean yield, kg ha^{-1}), being calculated through the relationship between primary production (kg ha^{-1}) and the total N, P, and K applied by the yearly fertilizations. Water productivity (WP) reflects the crop and pasture yields achieved per unit of water consumed[64,65]. The index was determined by dividing the pasture (THP, kg DM ha^{-1}) and crop production (soybean yield, kg ha^{-1}) by the rainfall received from each season[66].

4.9. Human-digestible protein and energy production

To compare integrated to non-integrated systems two metrics were employed to assess the additional production from livestock components. The human digestible protein (HDP) serves as an unbiased indicator of whole-system food production[67]. It was calculated by summing the protein content from the different human-edible sources, considering both the animal and crop components of the system, and multiplying by the protein digestibility of the products (beef and soybeans). Two different calculations were made to the same variable: total HDP was calculated using the final weight of cattle at the end of the pasture phase, and HDP gain was obtained using only the LWG per ha obtained by cattle during the grazing period. The protein content of live weight steers at the end of the stocking period was assumed to be 19% of its body weight[68] (kg kg^{-1}), while the protein content of soybeans was assumed to be 35% (kg kg^{-1}) for a grain moisture content of 13%[69]. Protein digestibility was considered as 94% for beef and 78% for soybean production[48].

System production in terms of energy (E) (GJ ha^{-1}) was calculated by multiplying the production during the pasture phase (THP and steer LWG) and crop phase (soybean yield) by their respective caloric values. The caloric values used were 18.05 MJ kg^{-1} for above-ground biomass[70], 13.1 MJ kg^{-1} for meat cattle carcass[71], and 15.05 MJ kg^{-1} for soybean grain[72]. The meat equivalent energy was determined by multiplying LWG by the equivalent carcass obtained in the same experiment (52% of LW[45]) and then multiplying by the equivalent energy.

4.10. Data analysis

Data was passed through outlier analysis using the interquartile range (IQR) approach in Excel software. The IQR was calculated as the difference between the third quartile (Q3) and the first quartile (Q1) of the data distribution. Observations falling outside the range defined by $Q1 - 1.5 * IQR$ and $Q3 + 1.5 * IQR$ were considered outliers and were removed from the dataset. The assumptions of the analysis of variance (ANOVA) were reached (normality by the Shapiro-Wilk test ($P > 0.05$), homogeneity of variance by the Bartlett test ($P > 0.05$), and residual visual analysis). When necessary, the database was transformed by raising the variable to the power of lambda. The appropriate lambda value was obtained by conducting a Box-Cox transformation analysis. ANOVA was performed at a significance level of 5% ($P < 0.05$) using a mixed model by the LMER function of the lme4 package in the R software[73].

For THP C inputs, as well as soil carbon and nitrogen stocks in the 0-20 cm layer, the pasture management (10, 20, 40, and UG), years (2001, 2004, 2014, and 2023), and their respective interactions were considered fixed effects. In these variables, the paddocks were considered as random effects. For soil carbon stock in the 0-100 cm layer, the fixed effects considered were the pasture management, depths, and their interactions. In this case, the best model fit was obtained with the block as random effects. As for primary production variables, nutrient use efficiencies, water productivity, total HDP, HDP gain, and energy production, the pasture managements were considered fixed effects, while the block and year were considered random effects. The Akaike Information Criterion (AIC) approach was used to identify the model with the best fit to the data. When differences were detected, means were compared by Tukey's test at 5% probability.

Acknowledgments

We are grateful to the Garcia de Garcia family and farm staff at Espinilho Farm for their support since the experimental protocol establishment. We also thank all the M.Sc., Ph.D., and undergraduate students who worked at the long-term ICLS experiment from the Regional University of Northwestern Rio Grande do Sul and from the Integrated Crop-Livestock System Research Group (GPSIPA) of the Federal University of Rio Grande do Sul. This work was financed in part by the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) through M.Sc. scholarship CNPq Process 131222/2022-8, Research Project CNPq Process 422331/2021-0, and by the Foundation for Research Support of the State of Rio Grande do Sul (FAPERGS) Project code 23/2551-0002163-3.

Author contributions

L.D.M. designed the study. P.C.F.C. conceived the long-term experiment and supervised the project. L.D.M. wrote the manuscript with contributions and improvements from V.J.L.P.S., P.C.F.C., and C.B. L.D.M and V.J.L.P.S. analyzed the data and interpreted the results. L.D.M. organized the long-term dataset and prepared tables and figures. L.D.M., C.S.C., L.P.D., G.L.L., A.P.S.D., and E.A.P performed the field work. E.A.P. provided laboratory spaces for sample processing. E.D.S. provided the soil data at the initial phase of the experiment. C.B. provided the materials and contributed to the 2023 soil collection. All authors contributed to reviewing and revising the final manuscript.

Competing interests

The authors declare no competing financial interests or personal relationships that could have influenced the work reported in this paper.

References

1. FAO, IFAD, UNICEF, WFP & WHO. *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023*. *The lancet. Diabetes & endocrinology* (2023). doi:10.4060/cc3017en.
2. Simili, F. F. *et al.* The economic value of sustainability of the integrated crop-livestock system

in relation to conventional systems. *Rev. Bras. Zootec.* **52**, 1–14 (2023).

3. Adesogan, A. T., Havelaar, A. H., McKune, S. L., Eilittä, M. & Dahl, G. E. Animal source foods: Sustainability problem or malnutrition and sustainability solution? Perspective matters. *Glob. Food Sec.* **25**, 100325 (2020).
4. Garrett, R. D. *et al.* Drivers of decoupling and recoupling of crop and livestock systems at farm and territorial scales. *Ecol. Soc.* **25**, art24 (2020).
5. Meunier, C., Martin, G., Barnaud, C. & Ryschawy, J. Bucking the trend: Crop farmers' motivations for reintegrating livestock. *Agric. Syst.* **214**, 103820 (2024).
6. de Albuquerque Nunes, P. A. *et al.* Livestock integration into soybean systems improves long-term system stability and profits without compromising crop yields. *Sci. Rep.* **11**, 1649 (2021).
7. Simões, V. J. L. P. *et al.* Structural soil quality and system fertilization efficiency in integrated crop-livestock system. *Agric. Ecosyst. Environ.* **349**, 108453 (2023).
8. Marchão, R. L. *et al.* Carbon and nitrogen stocks in a Brazilian clayey Oxisol: 13-year effects of integrated crop–livestock management systems. *Soil Tillage Res.* **103**, 442–450 (2009).
9. Freitas, I. C. de *et al.* Agrosilvopastoral Systems and Well-Managed Pastures Increase Soil Carbon Stocks in the Brazilian Cerrado. *Rangel. Ecol. Manag.* **73**, 776–785 (2020).
10. IPCC. *Climate change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/ (2007).
11. Liu, X., Wang, P., Song, H. & Zeng, X. Determinants of net primary productivity: Low-carbon development from the perspective of carbon sequestration. *Technol. Forecast. Soc. Change* **172**, 121006 (2021).
12. Schuman, G., Janzen, H. & Herrick, J. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environ. Pollut.* **116**, 391–396 (2002).
13. Kunrath, T. R. *et al.* Sward height determines pasture production and animal performance in long-term soybean-beef cattle integrated system. *Agric. Syst.* **177**, 102716 (2020).
14. Assmann, J. M. *et al.* Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities insubtropics. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* **108**, 21–33 (2017).
15. Garnett, T. *et al. Grazed and confused? Ruminating on cattle, grazing systems, methane, nitrous oxide, the soil carbon sequestration question – and what it all means for greenhouse gas emissions*. https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/publications/grazed-and-confused/ (2017).
16. Bayer, C., Lovato, T., Dieckow, J., Zanatta, J. A. & Mielniczuk, J. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. *Soil Tillage Res.* **91**, 217–226 (2006).
17. de Souza Filho, W. *et al.* Mitigation of enteric methane emissions through pasture management in integrated crop-livestock systems: Trade-offs between animal performance and environmental

impacts. *J. Clean. Prod.* **213**, 968–975 (2019).

18. Sollenberger, L. E., Kohmann, M. M., Dubeux, J. C. B. & Silveira, M. L. Grassland Management Affects Delivery of Regulating and Supporting Ecosystem Services. *Crop Sci.* **59**, 441–459 (2019).
19. CONAB. Safra Brasileira de Grãos. *Boletim da safra de grãos* https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos (2024).
20. Yang, X. *et al.* Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health. *Nat. Commun.* **15**, 198 (2024).
21. McAuliffe, G. A. *et al.* Protein quality as a complementary functional unit in life cycle assessment (LCA). *Int. J. Life Cycle Assess.* **28**, 146–155 (2023).
22. Leroy, F. *et al.* The role of meat in the human diet: evolutionary aspects and nutritional value. *Anim. Front.* **13**, 11–18 (2023).
23. Nelson, G. *et al.* Income growth and climate change effects on global nutrition security to mid-century. *Nat. Sustain.* **1**, 773–781 (2018).
24. Johnston, B., De Smet, S., Leroy, F., Mente, A. & Stanton, A. Non-communicable disease risk associated with red and processed meat consumption—magnitude, certainty, and contextuality of risk? *Anim. Front.* **13**, 19–27 (2023).
25. Richie, C. Environmental sustainability and the carbon emissions of pharmaceuticals. *J. Med. Ethics* **48**, 334–337 (2021).
26. Vincent Rajkumar, S. The high cost of prescription drugs: causes and solutions. *Blood Cancer J.* **10**, 71 (2020).
27. Manzano, P. *et al.* Challenges for the balanced attribution of livestock's environmental impacts: the art of conveying simple messages around complex realities. *Anim. Front.* **13**, 35–44 (2023).
28. Hewins, D. B. *et al.* Grazing and climate effects on soil organic carbon concentration and particle-size association in northern grasslands. *Sci. Rep.* **8**, 1336 (2018).
29. Gomez-Casanovas, N. *et al.* Grazing alters net ecosystem C fluxes and the global warming potential of a subtropical pasture. *Ecol. Appl.* **28**, 557–572 (2018).
30. Miranda, E., Carmo, J., Couto, E. & Camargo, P. Long-Term Changes in Soil Carbon Stocks in the Brazilian Cerrado Under Commercial Soybean. *L. Degrad. Dev.* **27**, 1586–1594 (2016).
31. Golluscio, R. A. *et al.* Sheep Grazing Decreases Organic Carbon and Nitrogen Pools in the Patagonian Steppe: Combination of Direct and Indirect Effects. *Ecosystems* **12**, 686–697 (2009).
32. McSherry, M. E. & Ritchie, M. E. Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. *Glob. Chang. Biol.* **19**, 1347–1357 (2013).
33. Lemaire, G. *et al.* Domestic Herbivores, the Crucial Trophic Level for Sustainable Agriculture: Avenues for Reconnecting Livestock to Cropping Systems. *Agronomy* **13**, 982 (2023).
34. Soussana, J.-F. & Lemaire, G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agric. Ecosyst. Environ.*

190, 9–17 (2014).

35. Alves, L. A. *et al.* Soil acidification and P, K, Ca and Mg budget as affected by sheep grazing and crop rotation in a long-term integrated crop-livestock system in southern Brazil. *Geoderma* **351**, 197–208 (2019).
36. Franzluebbers, A. J., van Vliet, S., Young, S. & Poore, M. H. Soil health and root-zone enrichment characteristics between paired grassland and cropland fields in the southeastern United States. *Grassl. Res.* **2**, 299–308 (2023).
37. De Faccio Carvalho, P. C. *et al.* Animal production and soil characteristics from integrated crop-livestock systems: toward sustainable intensification. *J. Anim. Sci.* **96**, 3513–3525 (2018).
38. Assmann, J. M. *et al.* Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop–livestock system under no-tillage in southern Brazil. *Agric. Ecosyst. Environ.* **190**, 52–59 (2014).
39. Johnston, A. E., Poulton, P. R., Coleman, K., Macdonald, A. J. & White, R. P. Changes in soil organic matter over 70 years in continuous arable and ley–arable rotations on a sandy loam soil in England. *Eur. J. Soil Sci.* **68**, 305–316 (2017).
40. Assmann, J. M. *et al.* Carbon and nitrogen cycling in an integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities. *Pesqui. Agropecu. Bras.* **50**, 967–978 (2015).
41. Chapman, D. & Lemaire, G. Tissue flows in grazed plant communities. in *The ecology and management of grazing systems* (eds. Hodgson, J. & Illius, A. W.) (CAB International, 1996).
42. Farias, G. D. *et al.* Integrated crop-livestock system with system fertilization approach improves food production and resource-use efficiency in agricultural lands. *Agron. Sustain. Dev.* **40**, 39 (2020).
43. Oliveira, J. G. *et al.* Nitrogen balance and efficiency as indicators for monitoring the proper use of fertilizers in agricultural and livestock systems. *Sci. Rep.* **12**, 12021 (2022).
44. Farias, G. D. *et al.* Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for soybean biomass and nutrient uptake estimation in response to production systems and fertilization strategies. *Front. Sustain. Food Syst.* **6**, (2023).
45. Rocha, L. M. D. *et al.* Performance and carcass characteristics of yearling bulls on winter pastures subjected to grazing intensities. *Pesqui. Agropecu. Bras.* **46**, 1379–1384 (2011).
46. Baggio, C. *et al.* Padrões de uso do tempo por novilhos em pastagem consorciada de azevém anual e aveia-preta. *Rev. Bras. Zootec.* **37**, 1912–1918 (2008).
47. Carvalho, P. C. de F. *et al.* Integrating the pastoral component in agricultural systems. *Rev. Bras. Zootec.* **47**, (2018).
48. van Zanten, H. H. E., Mollenhorst, H., Klootwijk, C. W., van Middelaar, C. E. & de Boer, I. J. M. Global food supply: land use efficiency of livestock systems. *Int. J. Life Cycle Assess.* **21**, 747–758 (2016).

49. Peyraud, J. L. & Peeters, A. The role of grassland based production system in the protein. in *The multiple roles of grassland in the European bioeconomy* (eds. Hoglind, M. et al.) vol. 21 29–43 (2016).
50. Beal, T. *et al.* Friend or Foe? The Role of Animal-Source Foods in Healthy and Environmentally Sustainable Diets. *J. Nutr.* **153**, 409–425 (2023).
51. Lemaire, G., Franzluebbers, A., Carvalho, P. C. de F. & Dedieu, B. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agric. Ecosyst. Environ.* **190**, 4–8 (2014).
52. de Moraes, A. *et al.* Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. *Eur. J. Agron.* **57**, 4–9 (2014).
53. de Souza, E. D. *et al.* Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. *Rev. Bras. Ciência do Solo* **33**, 1829–1836 (2009).
54. Cecagno, D. *et al.* Soil organic carbon in an integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Rev. Bras. Ciências Agrárias - Brazilian J. Agric. Sci.* **13**, 1–7 (2018).
55. Soil Survey Staff. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/soil-taxonomy (1999).
56. Commission of Chemistry and Soil Fertility (CQFS-RS/SC). *Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. (SBCS-NRS/EMBRAPA-CNPT, 2016).
57. Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L. & Sparoveck, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* **22**, 711–728 (2014).
58. INMET. Normais climatológicas do Brasil. *Instituto Nacional de Meteorologia* https://portal.inmet.gov.br/normais (2020).
59. Mott, G. O. & Lucas, H. L. The design, conduct and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. in *International grassland congress* vol. 6 1380–1395 (1952).
60. Barthram, G. T. *Experimental techniques: the HFRO sward stick*. *The Hill Farming Research Organization* (1985).
61. Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A. & Teixeira, W. G. *Manul de Métodos de Analise de Solo*. (2017).
62. Ellert, B. H. & Bettany, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci.* **75**, 529–538 (1995).
63. Dobermann, A. Nutrient use efficiency – measurement and management. in *Fertilizer Best Management Practices: General Principles, Strategy for Their Adoption and Voluntary Initiatives Versus Regulations* 1–28 (2007).
64. Kijne, J. W., Barker, R. & Molden, D. *Water Productivity in Agriculture: limits and*

opportunities for improvement. (CAB International, 2003).

65. Molden, D. Accounting for water use and productivity. *Int. Irrig. Manag. Inst.* (1997).
66. Fernández, J. E., Alcon, F., Diaz-Espejo, A., Hernandez-Santana, V. & Cuevas, M. V. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. *Agric. Water Manag.* **237**, 106074 (2020).
67. Gil, J. D. B. *et al.* Tradeoffs in the quest for climate smart agricultural intensification in Mato Grosso, Brazil. *Environ. Res. Lett.* **13**, (2018).
68. National Research Council. Growth and Body Reserves. in *Nutrient Requirements of Beef Cattle* 22–39 (2016).
69. USDA. Agricultural research service of the United States Department of Agriculture: FoodData Central. https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/174270/nutrients (2023).
70. Fuksa, P., Hakl, J. & Brant, V. Energy balance of catch crops production. *Zemdirbyste-Agriculture* **100**, 355–362 (2013).
71. Ferrell, C. L., Garrett, W. N. & Hinman, N. Estimation of Body Composition in Pregnant and Non-Pregnant Heifers. *J. Anim. Sci.* **42**, 1158–1166 (1976).
72. Alimagham, S. M., Soltani, A., Zeinali, E. & Kazemi, H. Energy flow analysis and estimation of greenhouse gases (GHG) emissions in different scenarios of soybean production (Case study: Gorgan region, Iran). *J. Clean. Prod.* **149**, 621–628 (2017).
73. R Core Team. R: a Language and Environmental for Statistical Computing. (2013).

3. CAPÍTULO III

3.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

3.1.1. Conclusões do trabalho

O estoque de carbono e nitrogênio no solo não é diretamente influenciado pela intensidade de pastejo, nem pela presença ou ausência de animais sob pastoreio em SIPA que integram lavoura de soja e pastagem de inverno no sul do Brasil. A longo prazo, ambos os manejos testados levam a aumento seguido de estabilização nesses estoques no solo, o que é devido principalmente ao aporte de nitrogênio no sistema. A partir dessa informação, o presente estudo evidencia que a inserção dos animais nas áreas de produção de grãos não é fator limitante para a qualidade do solo, mas sim fundamental para manter os níveis de carbono orgânico, principal constituinte da matéria orgânica do solo. Por outro lado, para se observar o mesmo comportamento nas áreas com cobertura de solo no período de inverno, a adubação nitrogenada é fundamental, contudo, esse sistema implica em perda de potencial de produção de alimentos devido à ausência dos animais.

Quanto à produção do sistema, o manejo do pasto com intensidades de pastejo moderadas e leves demonstram clara superioridade ao pastejo intenso (10 cm de altura do pasto). O controle da intensidade de pastejo permite que haja diferença substancial na produtividade de grãos da soja e na produção total de matéria seca da pastagem. Essa resposta se deve à maior eficiência no uso de nutrientes e água nessas intensidades ótimas. Além disso, mesmo que o correto manejo do pasto apresente produção primária semelhante às áreas não pastoreadas, a energia produzida sob pastejo é maior e representa a capacidade superior dos SIPA na utilização dos recursos. Finalmente, o SIPA sob pastejo moderado proporciona aumento substancial na produção de proteína digestível, entregando um acréscimo de 24% de provisão de alimentos.

Tais conclusões permitem inferir que o uso combinado dos SIPA com o correto ajuste no manejo das pastagens é capaz de fazer convergir a produção de alimentos e a sustentabilidade ambiental. Essa evidência tem forte impacto, particularmente no sul do Brasil, onde a possibilidade de expansão dos SIPA ainda é vasta, o que pode transformar o atual cenário, não só de produção de alimentos, mas de resultados socioeconômicos para toda a região.

3.1.2. Sugestões para pesquisas futuras

Apesar da importância da estabilização do carbono no solo como indicador de sistemas de produção alinhados a propostas de mitigação de mudanças climáticas, é importante destacar a capacidade da vegetação como dreno de carbono da atmosfera. Nesse sentido, futuras pesquisas vinculadas ao tema precisam considerar, além do carbono presente no solo, o resultado produtivo por meio da produtividade primária líquida dos diferentes sistemas, e a contribuição destes na produção de alimentos e na capacidade de sequestro de carbono na vegetação. Só podem ser considerados positivos os sistemas de produção que combinem conservação ambiental e alto potencial produtivo. O cenário atual e futuro da agricultura mundial requer sistemas capazes de aliar sustentabilidade ambiental, através da promoção de serviços ecossistêmicos de regulação e suporte, e segurança alimentar, por meio de serviços ecossistêmicos de provisão.

3.1.3. Observações pessoais

Ao chegar no final de mais uma etapa de formação profissional aproveito para aqui trazer outras conclusões para além das científicas. O período do mestrado foi, além de enriquecedor no âmbito profissional, um desafio inspirador no âmbito pessoal. Os dois anos passados aqui me fizeram crescer como ser humano, desenvolver habilidades, evoluir emocionalmente e viver experiências únicas. Mesmo com as dificuldades de encarar uma nova realidade e a mudança de vida em um local desconhecido, pude evoluir neste período muito mais do que pudesse imaginar no momento em que aqui cheguei. Dentre as principais descobertas, talvez a que tenha mais me transformado foi a capacidade de ampliar minha visão de mundo (cosmovisão), de compreender verdadeiramente que os sonhos existem para que possamos alcançá-los, e que, com coragem, determinação e disciplina, alcançamos qualquer aspiração.

A possibilidade de colaborar para a ciência que leva os avanços para a sociedade e melhora a vida das pessoas, me fez superar dificuldades e perceber que tenho muitas maneiras de contribuir para o mundo. Essa talvez seja a mensagem principal, e que aqui espero poder inspirar aos próximos que virão depois de mim. Hoje me sinto grato por tudo que pude viver, experienciar e evoluir, mas tenho certeza de que ainda tenho muito a colaborar, criar, desenvolver (e me desenvolver), tanto como pesquisador como ser humano.

REFERÊNCIAS

ABIEC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNES. **Beef report 2023:** perfil da pecuária no Brasil. Brasília, DF: ABIEC, 2023. Disponível em: https://www.abiec.com.br/catpub/impressos/. Acesso em: 30 jul. 2023.

ADESOGAN, A. T. *et al*. Animal source foods: sustainability problem or malnutrition and sustainability solution? Perspective matters. **Global Food Security**, Amsterdam, v. 25, [art.] 100325, 2020.

ALVES, L. A. *et al.* Soil acidification and P, K, Ca and Mg budget as affected by sheep grazing and crop rotation in a long-term integrated crop-livestock system in southern Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 351, p. 197–208, 2019.

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*. Ciclagem de nutrientes. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA, 1., 2017, Cascavel, PR. [**Anais**]. [*S. l.*]: IAPAR, EMATER, EMBRAPA, 2017. p. 56–66.

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 subtrópico brasileiro. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 8, p. 380, 2013.

ASSMANN, J. M. *et al*. Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities in subtropics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 108, n. 1, p. 21–33, 2017.

ASSMANN, J. M. *et al*. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop–livestock system under no-tillage in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 52–59, 2014.

AYARZA, M. *et al*. Soil carbon accumulation in crop-livestock systems in acid soil savannas of South America: a review. *In*: SPARKS, D. L. (org.). **Advances in agronomy**. [Cham]: Elsevier, 2022. v. 173, p. 163–226.

BAGGIO, C. *et al*. Padrões de uso do tempo por novilhos em pastagem consorciada de azevém anual e aveia-preta. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 37, n. 11, p. 1912–1918, 2008.

BARBOSA, C. M. P. *et al*. Efeito de métodos e intensidades de pastejo sobre a ressemeadura natural de azevém anual. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, Maringá, v. 30, n. 4, p. 387–393, 2008.

BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 47, n. 2, p. 151–163, 1996.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO2. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 3, p. 599–607, 2000.

BEAL, T. *et al.* Friend or foe? The role of animal-source foods in healthy and environmentally sustainable diets. **The Journal of Nutrition**, New York, v. 153, n. 2, p. 409–425, 2023.

BECKER, A. E. *et al*. Surface-soil carbon stocks greater under well-managed grazed pasture than row crops. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 86, n. 3, p. 758–768, 2022.

BEHNKE, R. H. Grazing into the anthropocene or back to the future? **Frontiers in Sustainable Food Systems**, Lausanne, v. 5, [art.] 638806, [p. 1–20], 2021.

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

BELS, V. **Feeding in domestic vertebrates:** from structure do behaviour. 6th ed. Paris: CABI Publishing, 2006.

BLAIR, G.; LEFROY, R.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, East Melbourne, v. 46, n. 7, p. 1459-1466, 1995.

BLAIR, J.; NIPPERT, J.; BRIGGS, J. Grassland ecology. *In*: MONSON, R. K. (org.). **Ecology and the environment**. New York: Springer, 2014. p. 389–423.

BOGAARD, A. *et al*. Crop manuring and intensive land management by Europe's first farmers. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, DC, v. 110, n. 31, p. 12589–12594, 2013.

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.

BOVAL, M.; SAUVANT, D. Ingestive behaviour of grazing ruminants: meta-analysis of the components linking bite mass to daily intake. **Animal Feed Science and Technology**, Amsterdam, v. 278, n. 6, [art.] 115014, 2021.

BYRNES, R. C. *et al*. A global meta-analysis of grazing impacts on soil health indicators. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 47, n. 4, p. 758–765, 2018.

CAI, A. *et al*. Declines in soil carbon storage under no tillage can be alleviated in the long run. **Geoderma**, Amsterdam, v. 425, n. 7, [art.] 116028, 2022.

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

CARVALHO, P. C. *et al.* A Brazilian initiative for sustainable development of smallholder dairy farming: the PISA Program. *In*: HADJIPAVLOU, G.; LIGDA, C. (org.). **Addressing the challenges of agro-pastoral farming systems to strengthen their resilience**. Zaragoza: CIHEAM, 2022. v. 24, p. 17–24. *E-book*. Disponível em: https://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=00008092. Acesso em: 30 jul. 2023.

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*. Como a estrutura do pasto influencia o animal em pastejo? Exemplificando as interações planta-animal sob as bases e fundamentos do Pastoreio “Rotatínuo”. *In*: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM, 8., 2016, Viçosa, MG. [**Anais**]. Viçosa: [UFV], 2016.

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. Harry stobbs memorial lecture: can grazing behavior support innovations in grassland management? **Tropical Grasslands - Forrajes Tropicales**, Cali, v. 1, n. 2, p. 137-155, 2013.

CARVALHO, P. C. F. *et al*. Importância da estrutura da pastagem na ingestão e seleção de dietas pelo animal em pastejo. *In*: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 38., 2001, Piracicaba. **Anais**. Piracicaba: SBZ, 2001. v. 1, p. 853–871.

CARVALHO, P. C. F. *et al*. O estado da arte em integração lavoura e pecuária. *In*: GOTTSCHALL, C. S.; SILVA, J. L. S.; RODRIGUES, N. C. (org.). **Produção animal:** mitos, pesquisa e adoção de tecnologia. Canoas: Ed. Ulbra, 2005. p. 7–44.

CARVALHO, P. C. F. *et al*. Reconnecting grazing livestock to crop landscapes: reversing specialization trends to restore landscape multifunctionality. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, Lausanne, v. 5, [art.] 750765, 2021.

CARVALHO, P. C.; NUNES, P. A. D. A.; ANGHINONI, I. F. R. G. S. O processo de pastejo como gerador de propriedades emergentes em sistemas integrados de produção agropecuária. *In*: SOUZA, E. D. *et al*. (org.). **Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil**. Brasília, DF: Copiart, 2018. p. 39–44.

CECAGNO, D. *et al*. Soil organic carbon in an integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 13, n. 3, [art.] e5553, [p. 1–7], 2018.

CHAPMAN, D.; LEMAIRE, G. Tissue flows in grazed plant communities. *In*: HODGSON, J.; ILLIUS, A. W. (org.). **The ecology and management of grazing systems**. Guilford: CAB International, 1996. p. 3-36.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safra 2023/24: quarto levantamento. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Grãos**. Brasília, DF, v. 11, n. 4, p. 1-110, 2024. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos. Acesso em: 31 jan. 2024.

DAMIAN, J. M. *et al*. Intensification and diversification of pasturelands in Brazil: patterns and driving factors in the soil carbon stocks. **Catena**, Cremlingen, v. 220, [art.] 106750, 2023.

DHALIWAL, J. K.; KUMAR, S. Hydro-physical soil properties as influenced by short and long-term integrated crop–livestock agroecosystems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 85, n. 3, p. 789–799, 2021.

DOMINSCHEK, R. *et al*. Diversification of traditional paddy field impacts target species in weed seedbank. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 53, p. 1–10, 2022.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **An international consultation on integrated crop-livestock systems for development:** the way forward for sustainable production intensification. Rome: FAO, 2010. v. 13. *E-book*. Disponível em: https://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/spi/iclsd/en/. Acesso em: 14 jun. 2023.

FAO; ITPS - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. INTERGOVERNMENTAL TECHNICAL PANEL ON SOILS. **Global soil organic carbon map (GSOCmap):** technical report. Rome: FAO, ITPS, 2018. *E-book*. Disponível em: https://www.fao.org/documents/card/en/c/I8891EN. Acesso em: 14 jun. 2023.

FARIAS, G. D. *et al.* Integrated crop-livestock system with system fertilization approach improves food production and resource-use efficiency in agricultural lands. **Agronomy for Sustainable Development**, Les Ulis, v. 40, n. 6, [art.] 39, 2020.

FRANZLUEBBERS, A. J.; MARTIN, G. Farming with forages can reconnect crop and livestock operations to enhance circularity and foster ecosystem services. **Grass and Forage Science**, Oxford, v. 77, n. 4, p. 270–281, 2022.

GABA, S. *et al*. Ecology for sustainable and multifunctional agriculture. *In*: GABA, S.; SMITH, B.; LICHTFOUSE, E. (org.). **Sustainable agriculture reviews 28**. Cham: Springer Cham, 2018. p. 1–46. *E-book*. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-90309-5_1. Acesso em: 8 jan. 2024

GALLI, J. R.; CANGIANO, C. A.; FERNÁNDEZ, H. Comportamiento ingestivo y consumo de bovinos en pastoreo. **Revista Argentina de Producción Animal**, Buenos Aires, v. 16, n. 2, p. 1–10, 1996.

GERBER, P. J. *et al*. **Tackling climate change through livestock:** a global assessment of emmisions and mitigation opportunities. Rome: FAO, 2013. *E-book*. Disponível em: https://www.fao.org/policy-support/tools-and-publications/resources-details/en/c/1235389/. Acesso em: 30 jul. 2023.

HERRERO, M. *et al.* Livestock, livelihoods and the environment: understanding the trade-offs. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, Maryland Heights, v. 1, n. 2, p. 111–120, 2009.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2021:** the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Geneva: IPCC], 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/. Acesso em: 2 ago. 2022.

JOHNSTON, B. *et al.* Non-communicable disease risk associated with red and processed meat consumption—magnitude, certainty, and contextuality of risk? **Animal Frontiers**, London, v. 13, n. 2, p. 19–27, 2023.

JONES, S. K. *et al*. Agrobiodiversity Index scores show agrobiodiversity is underutilized in national food systems. **Nature Food**, London, v. 2, n. 9, p. 712–723, 2021.

KIBBLEWHITE, M.; RITZ, K.; SWIFT, M. Soil health in agricultural systems. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, London, v. 363, n. 1492, p. 685–701, 2008.

KUNRATH, T. R. *et al*. Grazing management in an integrated crop-livestock system: soybean development and grain yield. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 3, p. 645–653, 2015.

KUNRATH, T. R. *et al*. Sward height determines pasture production and animal performance in long-term soybean-beef cattle integrated system. **Agricultural Systems**, Barking, v. 177, [art.] 102716, 2020.

LACA, E. A. *et al*. Effects of sward height and bulk density on bite dimensions of cattle grazing homogeneous swards. **Grass and Forage Science**, Oxford, v. 47, n. 1, p. 91–102, 1992.

LACA, E. A.; ORTEGA, I. M. Integrating foraging mechanisms across spatial and temporal scales. *In*: FIFTH INTERNATIONAL RANGELAND CONGRESS, 5., 1996, Salt Lake City. [**Proceedings of the ...**]. Salt Lake City: Society for Range Management, 1996. p. 129–132.

LEMAIRE, G. *et al*. Domestic herbivores, the crucial trophic level for sustainable agriculture: avenues for reconnecting livestock to cropping systems. **Agronomy**, Basel, v. 13, n. 4, [art.] 982, 2023.

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.

LEROY, F. *et al*. The role of meat in the human diet: evolutionary aspects and nutritional value. **Animal Frontiers**, London, v. 13, n. 2, p. 11–18, 2023.

LIU, X. *et al*. Determinants of net primary productivity: Low-carbon development from the perspective of carbon sequestration. **Technological Forecasting and Social Change**, New York, v. 172, [art.] 121006, 2021.

MANZATTO, C. V. *et al*. Estimativas de redução de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas ILPF no Brasil. *In*: SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V. (org.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil:** estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 400–424.

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

MCAULIFFE, G. A. *et al*. Protein quality as a complementary functional unit in life cycle assessment (LCA). **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Landsberg, v. 28, n. 2, p. 146–155, 2023.

MCNALLY, S. R. *et al*. Root carbon inputs under moderately diverse sward and conventional ryegrass-clover pasture: implications for soil carbon sequestration. **Plant and Soil**, The Hague, v. 392, n. 1/2, p. 289–299, 2015.

MOOJEN, F. G. *et al*. Herbage allowance and stocking method effect on grazing systems: results of a long-term experiment. **Grass and Forage Science**, Oxford, v. 77, n. 1, p. 45–54, 2022.

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

MORAES, A. *et al*. Sistemas integrados de produção agropecuária: conceitos básicos e histórico no Brasil. *In*: SOUZA, E. D. *et al*. (org.). **Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil**. Brasília, DF: Copiart, 2018. p. 13–28.

MORAINE, M.; DURU, M.; THEROND, O. A social-ecological framework for analyzing and designing integrated crop–livestock systems from farm to territory levels. **Renewable Agriculture and Food Systems**, Greenbelt, v. 32, n. 1, p. 43–56, 2017.

NELSON, G. *et al*. Income growth and climate change effects on global nutrition security to mid-century. **Nature Sustainability**, London, v. 1, n. 12, p. 773–781, 2018.

NUNES, P. A. A. *et al*. How does grazing intensity determine vegetation spatial heterogeneity within an Integrated Crop-Livestock System. *In*: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 53., 2016, Gramado, RS. [**Anais eletrônicos**]. Gramado: SBZ, 2016.

NUNES, P. A. A. *et al*. Livestock integration into soybean systems improves long-term system stability and profits without compromising crop yields. **Scientific Reports**, London, v. 11, n. 1, [art.] 1649, 2021.

PETERSON, C. A. *et al*. Winter grazing does not affect soybean yield despite lower soil water content in a subtropical crop-livestock system. **Agronomy for Sustainable Development**, Les Ulis, v. 39, n. 2, [art.] 26, 2019.

POLIDORO, J. C. *et al*. The impact of plans, policies, practices and technologies based on the principles of conservation agriculture in the control of soil erosion in Brazil. **Authorea**, Hoboken, v. 1, n. 1, p. 1–16, 2020.

RODRIGUES, L. A. T. *et al*. Carbon saturation deficit and litter quality drive the stabilization of litter-derived C in mineral-associated organic matter in long-term no-till soil. **Catena**, Cremlingen, v. 219, n. 12, [art.] 106590, 2022.

RUSSELLE, M. P. *et al*. Managing nitrogen contaminated soils: benefits of N2 fixing alfalfa. **Agronomy Journal**, Madidon, v. 99, n. 3, p. 738–746, 2007.

SAVIAN, J. V. *et al*. Rotatinuous stocking: a grazing management innovation that has high potential to mitigate methane emissions by sheep. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 186, p. 602–608, 2018.

SBRISSIA, A. F.; SILVA, S. C.; NASCIMENTO JÚNIOR, D. Ecofisiologia de plantas forrageiras e o manejo do pastejo. *In*: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 24., 2007, Piracicaba. [**Anais**]. Piracicaba: FEALQ, 2007. p. 1–20.

SEARCHINGER, T. *et al*. **Creating a sustainable food future:** a menu of solutions to sustainably feed nearly 10 billion people by 2050. [*S. l.*]: World Resources Institute, 2019.

SEARLE, K. R.; SHIPLEY L. A. The comparative feeding behaviour of large browsing and grazing herbivores. *In:* GORDON, I. J.; PRINS, H. H. T. (ed.). **The ecology of browsing and grazing**. Heidelberg: Springer Berlin, 2008. *E-book*. Disponível em: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-72422-3. Acesso em: 14 maio 2023.

SILVA, F. D. *et al*. Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop–livestock production with different pasture grazing intensities in Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 60–69, 2014.

SIMÕES, V. J. L. P. *et al*. Structural soil quality and system fertilization efficiency in integrated crop-livestock system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 349, [art.] 108453, 2023.

SOLLENBERGER, L. E. *et al*. Grassland management affects delivery of regulating and supporting ecosystem services. **Crop Science**, Madison, v. 59, n. 2, p. 441–459, 2019.

SOUZA, E. D. *et al*. Carbono orgânico e fósforo microbiano em sistema de integração agricultura-pecuária submetido a diferentes intensidades de pastejo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 3, p. 1273–1282, 2008.

SOUZA, E. D. *et al*. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 6, p. 1829–1836, 2009.

SOUZA FILHO, W. *et al*. Mitigation of enteric methane emissions through pasture management in integrated crop-livestock systems: trade-offs between animal performance and environmental impacts. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 213, p. 968–975, 2019.

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.

STANLEY, P. L. *et al*. Ruminating on soil carbon: applying current understanding to inform grazing management. **Global Change Biology**, Oxford, v. 30, n. 3, [art.] e17223, [p. 1–20], 2024.

STOORVOGEL, J. J. *et al.* To what extent did we change our soils? A global comparison of natural and current conditions. **Land Degradation and Development**, Chichester, v. 28, n. 7, p. 1982–1991, 2017.

SZYMCZAK, L. S. *et al*. System diversification and grazing management as resilience-enhancing agricultural practices: the case of crop-livestock integration. **Agricultural Systems**, Braking, v. 184, [art.] 102904, 2020.

TAUBE, F.; NYAMEASEM, J. K.; FENGER, F. Closed-loop combined crop–livestock farming systems. *In*: AMON, B. (org.). **Developing circular agricultural production systems**. Cambridge: Burleigh Dodds Science, 2024. p. 35–64.

THOMAS, M. *et al.* Agro-écologie et écologie industrielle: deux alternatives complémentaires pour les systèmes d’élevage de demain. **INRAE Productions Animales**, Paris, v. 27, n. 2, p. 89–100, 2014.

ZHOU, G. *et al*. Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis. **Global Change Biology**, Oxford, v. 23, n. 3, p. 1167–1179, 2017.

5. APÊNDICES

APÊNDICE A - Normas para elaboração e submissão de trabalhos científicos à revista Nature Food.

nature > nature food > submission guidelines

Submission Guidelines

When submitting your manuscript, please read the following guidelines, which will help you through the submission and publication process.

1 – What you need to know before initial submission

- Make sure *Nature Food* is the most suitable journal for your work – Aims and scope
- Check that *Nature Food* accepts the content type you are working on – Content types
- Read and understand our policies – Editorial policies
- Understand our publishing models and costs – Publishing options
- Does *Nature Food* accept Presubmission enquiries? – Presubmission enquiries
- Our preprint policy – Preprint policy and In Review

---

2 – Preparing your material for initial submission

- Make sure your submission is complete – Preparing your material
- Understand the initial formatting requirements – Formatting for initial submission
- Make sure your manuscript is accurate and readable – Writing and language
- Do you want to participate in Double-blind Peer Review? – Double-blind Peer review requirements

YOU ARE NOW READY TO SUBMIT YOUR MANUSCRIPT

Click 'Submit manuscript' and you will be taken to our online submission system, where you can upload the required files and check on the status of your manuscript after submission. You will need to log in; if you do not have an account, you will be able to register for one when you submit.

Submit manuscript

---

3 – Editorial Process, Peer Review, Appeals & Transfers

Once you have submitted your manuscript, it goes through our editorial process.

If your manuscript is sent out for peer review, you will receive an email asking you to read and sign our Editorial Policies.

To appeal against a decision, or transfer your submission to another journal – Appeals and Transfers.

---

4 – Acceptance in Principle & Formatting

If your article is accepted for publication (known as Acceptance in Principle), you will need to follow the formatting guidelines.

Before final acceptance, we request that corresponding authors of accepted papers link their Open Researcher and Contributor Identifier (ORCID) to their manuscript tracking system account – ORCID instructions.

---

5 – Production & Publication

Once your manuscript is formally accepted, it is sent to Production to prepare for publication – production process.

Nature Food (*Nat Food*) | ISSN 2662-1355 (online)

Normas obtidas no site oficial da revista: https://www.nature.com/natfood/submission-guidelines

Acesso em 08 de março de 2024.

6. VITA

Leonardo Dallabrida Mori, filho de Almanir Inês Dallabrida e Sérgio Antônio Mori, nasceu no dia 25 de agosto de 1998, em Cruz Alta, Rio Grande do Sul, Brasil. Cresceu e residiu no interior do município de Pejuçara, acompanhando os pais desde criança na atividade agropecuária, a qual sempre admirou. No mesmo município cursou o Ensino Fundamental e Médio na Escola Estadual de Educação Básica Ângelo Furian, tendo concluído seus estudos no ano de 2015. Em 2016 ingressou no curso de Agronomia da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ), na qual, a partir do terceiro semestre de graduação, ingressou nas atividades de iniciação científica, como voluntário, no Grupo de Pesquisa em Plantas Forrageiras, sob orientação do Prof. Dr. Emerson André Pereira. No mesmo grupo seguiu até o final da graduação, tendo a oportunidade de atuar como bolsista CNPq de iniciação científica entre os anos de 2018 até 2021. Nesse período atuou na temática de melhoramento genético vegetal de plantas forrageiras nativas do Bioma Pampa, além de participar em pesquisas envolvendo espécies forrageiras cultivadas e manejo de pastagens. Formou-se Engenheiro Agrônomo em fevereiro de 2022 e, em abril do mesmo ano, iniciou o curso de Mestrado em Zootecnia na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), sob orientação do Prof. Dr. Paulo César de Faccio Carvalho. Em dezembro de 2023 foi aprovado no Processo Seletivo do Programa de Pós-graduação em Zootecnia/UFRGS para o curso de Doutorado. Foi submetido à banca de defesa da Dissertação de Mestrado no dia 18 de março de 2024.