

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

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE
PRODUÇÃO DE GRÃOS E OVINOS DE CORTE**

**Lucas Aquino Alves
(Dissertação de Mestrado)**

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

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE
PRODUÇÃO DE GRÃOS E OVINOS DE CORTE**

LUCAS AQUINO ALVES
Engenheiro Agrônomo (UFSM - FW)

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

Porto Alegre (RS) Brasil
Março de 2019

CIP - Catalogação na Publicação

Aquino Alves, Lucas

Atributos químicos do solo em sistemas integrados de produção de grãos e ovinos de corte / Lucas Aquino Alves. -- 2019.

66 f.

Orientador: Tales Tiecher.

Coorientadora: Amanda Posselt Martins.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Intensidade de pastejo. 2. Método de pastoreio. 3. Pastejo ovino. 4. Rotação de culturas. 5. Plantio direto. I. Tiecher, Tales, orient. II. Posselt Martins, Amanda, coorient. III. Título.

LUCAS AQUINO ALVES
Engenheiro Agrônomo - UFSM


DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

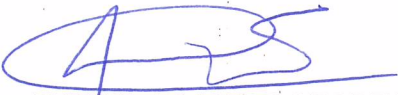
MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

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


Aprovado em: 22.03.2019
Pela Banca Examinadora



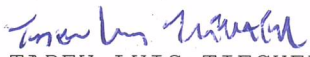
TALES TIECHER
Orientador
PPG Ciência do Solo/UFRGS



AMANDA POSSELT MARTINS
Co-Orientadora
PPG Ciência do Solo/UFRGS



CIMÉLIO BAYER
Departamento de Solos/UFRGS



TADEU LUIS TIECHER
IFRS
Campus Porto Alegre

DANILO RHEINHEIMER DOS SANTOS
Departamento de Solos/UFSM
(através de videoconferência)

Homologado em: 10.11.2020
Por



CARLOS GUSTAVO TORNQUIST
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação
em Ciência do Solo



CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade
de Agronomia

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”
(Arthur Schopenhauer)

“Quando a moral se entrega o homem chega ao seu próprio fim, mas debaixo da macega se esconde o melhor do capim, debaixo do sombreiro tem um bugre missioneiro peleando dentro de mim.”
(Mano Lima)

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar vivo e ter a oportunidade de escrever a minha história.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de realização do Mestrado. Agradeço ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos durante estes dois anos.

Ao professor e orientador Tales Tiecher, o qual sempre teve máxima dedicação em sua orientação, nunca excedendo 24 horas para responder os e-mails, já com as correções feitas. A ti agradeço imensamente pela confiança, e por ter oportunizado esse meu crescimento pessoal. Estendo os agradecimentos a minha co-orientadora Amanda Posselt Martins, a qual colaborou muito para o desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Cimélio Bayer pela ajuda e contribuição nas análises, sem a sua disponibilidade e boa vontade, boa parte desses resultados não estariam sendo apresentados nessa dissertação.

Aos professores Ibanor Anghinoni e Paulo Carvalho, pela iniciativa de quase 20 anos atrás, de inserirem os estudos em sistemas integrados de produção agropecuária no sul do Brasil, e de oportunizarem que eu esteja trabalhando nessa temática hoje.

A todos aos alunos de iniciação científica, mestrandos e doutorandos dos programas de Pós-Graduação em Ciência do Solo e Zootecnia que conduziram a área experimental durante 14 anos.

Agradeço a todos os membros do IRGEB (Grupo Interdisciplinar de Pesquisa em Biogeoquímica Ambiental) pela ajuda e momentos de discussão. A vocês Amanda, Adriano, Bruno, Bruna, Diego, David, Dionata, Fernando, Gian, Jacques, Jeniffer, João Pedro, Júlia, Liana, Luciana, Luciano, Luiz Denardin, Marcelo, Mateus, Miguel, Rafael Ramon, Tainá, Tauana, Victória e Vinícius serei eternamente grato.

Ao técnico Adão Luiz que sempre esteve disponível para ajudar em tudo que foi solicitado, além de um grande amigo que levarei para a vida.

Ao amigo e irmão Luiz Gustavo Denardin, que nunca mediu esforços para ajudar, mesmo longe, seus áudios de “cinco” minutos traziam a informação precisa. E ao grande amigo Rafael Ramon que completa nosso trio. A vocês serei eternamente grato!

Aos amigos João Pedro, Murilo, Carla, Victória e Marília que sempre foram parceiros para um vinho sexta à noite. Saiba que esses momentos foram muito importantes para mim e espero repeti-los mais vezes.

Ao amigo Cícero Ortigara que traçou o rumo junto comigo, saindo de Frederico Westphalen e vindo para Porto Alegre. Uma amizade antiga que só fortalece com o tempo. Obrigado Cícero por tudo que passamos juntos!

Aos colegas de apartamento Luan, Tiago, Gustavo e Daniel. Obrigado por serem a minha família nesse momento!

Ao quarteto Luiz Denardin, Dionata Filippi e João Pedro, o qual tenho prazer de completar. Vocês foram minha base científica e psicológica, e provaram mais uma vez que a amizade está acima de tudo. Obrigado Patetas!

Aos amigos Junior Damian, Felipe Bonini, Cícero Ortigara, Vanessa Harlos, Lucas Perin e Bianca Cassol. Obrigado pelos momentos bons vividos com vocês.

Ao professor Vanderlei por ter confiado em mim durante a graduação e proporcionado o que estou vivendo hoje.

A minha namorada Rafaella, que mesmo de longe sempre me deu forças para continuar e entendeu minhas ausências. Te amo!

Aos meus avós, Setembrino, Cilda, Amantino e Irene que são exemplos de sabedoria, que mesmo sem entender direito o que faço, sentem orgulho de seu neto. Obrigado por tudo e amo muito vocês!

Enfim, quero agradecer aqueles que acompanharam toda a minha trajetória e fizeram com que ela fosse possível. Volmar e Ilza, vocês foram os melhores pais que um filho pode ter, merecem mais do que eu todas as conquistas. Lidiane, obrigado por ser essa irmã que me completa. Amo vocês incondicionalmente!

Gratidão a todos vocês!

ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO DE GRÃOS E OVINOS DE CORTE¹

Autor: Eng. Agr. Lucas Aquino Alves

Orientador: Prof. Dr. Tales Tiecher

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Amanda Posselt Martins

RESUMO

A inserção do componente animal no sistema de produção agrícola pode alterar a dinâmica dos nutrientes e, conseqüentemente, a fertilidade do solo e a produtividade das culturas ao longo do tempo. Essa mudança ocorre de forma distinta de acordo com o arranjo adotado, em função tanto da intensidade quanto da frequência dos componentes animais e vegetais. O objetivo deste estudo foi avaliar o impacto da intensidade e frequência do componente animal em dois sistemas de cultivo agrícola, monocultivo de soja e rotação soja/milho, sobre (i) os atributos químicos do solo ao longo do tempo, distribuição vertical e o balanço de nutrientes no solo; (ii) a produtividade dos cultivos; e (iii) o teor e estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo após 14 anos da adoção de um sistema integrado de produção de grãos e ovinos de corte. O estudo foi conduzido em um experimento de longo prazo, iniciado em 2003, disposto em um delineamento de blocos casualizados em fatorial, com parcelas subdivididas, testando duas intensidades de pastejo (moderada e baixa) e dois métodos de pastoreio (contínuo e rotacionado), subdivididas em dois sistemas de cultivo (monocultivo de soja e rotação de soja/milho). Os atributos químicos avaliados foram: pH em água, Al, Ca e Mg trocáveis, P e K disponíveis, saturação por bases (V), saturação por Al (m), capacidade de troca de cátions (CTC), carbono (C) e nitrogênio (N) no solo. Houve uma intensa acidificação do solo ao longo dos 14 anos, com a diminuição do pH, V, Ca, Mg e K, e um aumento do Al e da m. O balanço negativo de K foi mais intenso na monocultura de soja devido à maior exportação do nutriente pelos grãos da leguminosa. Os teores e estoques de C e N no solo foram superiores no monocultivo de soja e na intensidade de pastejo baixo. A produtividade do milho e da soja foram baixas em todos os tratamentos, mas responderam positivamente a baixa intensidade de pastejo, sendo que a produtividade da soja foi superior no método de pastoreio rotativo, independente da intensidade de pastejo adotada. Os atributos químicos de solo foram pouco alterados pelos métodos e intensidades de pastoreio, devido ao poder reciclador do animal, que devolve para o sistema a maioria dos nutrientes ingeridos. Porém, as intensidades de pastejo alteram a dinâmica do C no solo, devido ao maior aporte de resíduos na intensidade de pastejo baixa. Embora o milho tenha um grande potencial em aportar resíduos ao solo, a cultura da soja aporta um resíduo de melhor qualidade e, por ser menos susceptível a estresses hídricos, pode ser mais eficiente em aumentar/manter os estoques de C e N em locais onde há limitação hídrica no período estival.

Palavras-chave: rotação de culturas, pastejo ovino, manejo de nutrientes

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (63 p.). Março, 2019. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq.

SOIL CHEMICAL PROPERTIES IN AN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEM¹

Author: Lucas Aquino Alves
Adviser: Tales Tiecher
Co-advisor: Amanda Posselt Martins

ABSTRACT

The insertion of the animal component into the crop production system can alter nutrient dynamics and consequently soil fertility and crop productivity over time. This change occurs differently according to the arrangement adopted, depending on both the intensity and the frequency of the animal and plant component. The objective of this study was to evaluate the impact of the presence of the animal on different intensities and stocking methods in two systems of agricultural cultivation, monoculture of soybean and crop rotation of soybean/maize, on (i) soil chemical properties over time, vertical distribution and soil nutrient balance, (ii) crop productivity, and (iii) the content and stock of carbon (C) and nitrogen (N) in the soil after 14 years of the adoption of an integrated grains and sheep system. The study was performed in an experiment long term established in 2003, arranged in a randomized block design with split plots. The treatments are two grazing intensities (moderate and low), two methods of grazing (continuous and rotational) subdivided into two crop systems (monoculture of soybean and soybean/corn rotation). The chemical properties evaluated were: pH in water; Al, Ca and Mg exchangeable; P and K available; base saturation (V); saturation by Al (m); cation exchange capacity (CEC), carbon (C) and nitrogen (N) in the soil. There was intense acidification of the soil over the 14 years, with the decrease of pH, V, Ca, Mg and K, and an increase of Al and m. The balance of K was more negative in soybean monoculture due to the greater export of the nutrient by the grains of the legume. The contents and stocks of C and N in the soil were higher in soy monoculture and low grazing intensity. Maize and soybean yields were higher in low grazing intensity, and soybean yield was higher in the rotational stocking method, regardless of the grazing intensity adopted. The soil chemical attributes were little altered by grazing intensities and methods, due to the animal's recycling, which returns to the system most of the nutrients ingested. However, grazing intensities alter soil C dynamics, due to the higher amount of residues in the low grazing intensity. Although maize has a great potential to contribute residues to the soil, the soybean crop provides a better quality residue and, because it is less susceptible to water stresses, it can be more efficient in increasing/maintaining the C and N stocks in places where there is water limitation in the summer period.

Keywords: crop rotation, sheep grazing, nutrient management.

¹ Master dissertation in Soil Science - Graduate Program in Soil Science, Faculty of Agronomy. Federal University of Rio Grande do Sul. Porto Alegre (63 p.). March 2019. This research was sponsored by CNPq.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – Introdução geral.....	1
CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica	2
CAPÍTULO III: 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.....	6
1. Introduction	6
2. Material and methods	9
2.1. History of the experimental area.....	9
2.3. Temporal evaluation of soil chemical properties.....	12
2.4. Evaluation of the vertical distribution of acidity and soil nutrient availability.....	13
2.5. Nutrient budget.....	13
2.6. Statistical analysis	14
3. Results and discussion.....	15
3.1. Temporal evolution of chemical properties of soil fertility	15
3.2. Vertical distribution of chemical properties of soil fertility	20
3.3. Soil nutrient budget	24
4. Conclusions.....	32
CAPÍTULO IV – Efeito da rotação de culturas e do manejo da pastagem sobre a produtividade dos cultivos e os estoques de C e N no solo	33
1. Introdução	33
2. Material e métodos.....	36
2.1. Histórico e condução experimental	36
2.2. Produtividade dos cultivos.....	36

2.3. Determinação da produção total e residual do azevém	36
2.4. Avaliação dos teores e estoques de C e N no solo	37
2.5. Análise estatística	37
3. Resultados	39
3.1. Produtividade das culturas e da pastagem	39
3.2. Carbono orgânico e nitrogênio total no solo	42
4. Discussão.....	46
5. Conclusões	50
CAPÍTULO V – Conclusões e Considerações Finais	51
Referências Bibliográficas.....	52
Apêndices	62
Resumo Biográfico	64

RELAÇÃO DE TABELAS

Table 1. Amount of nutrients added via fertilizers in winter (ryegrass) and summer (soybean or maize) seasons over 14-years (from 2003 to 2016) in a long-term integrated crop-livestock system experiment in southern Brazil.....	11
Table 2. Significance of the effects of experimental factors and their interactions on soil chemical properties over 14-years (from 2003 to 2016) in a long-term integrated crop-livestock system experiment in southern Brazil, as resulting from analysis of variance (ANOVA).....	18
Table 3. Significance of the effects of experimental factors and their interactions on soil chemical properties after 14-years of a long-term integrated crop-livestock system experiment in southern Brazil, as resulting from analysis of variance (ANOVA).....	18
Table 4. Significance of the effects of experimental factors and their interactions on nutrient budget over 14-years in a long-term integrated crop-livestock system experiment in southern Brazil, as resulting from analysis of variance (ANOVA).	25
Table 5. P, K, Ca, and Mg budget for the 0-10 cm soil layer comparing the effect of crop systems after 14-years in a long-term integrated crop-livestock system experiment in southern Brazil.....	28
Table 6. P and Mg budget for the 0-10 cm soil layer comparing stocking method and grazing intensity after 14-years in a long-term integrated crop-livestock system experiment in southern Brazil.	29
Table 7. K and Ca budget for the 0-10 cm soil layer comparing the interaction between stocking method and grazing intensity after 14-years in a long-term integrated crop-livestock system experiment in southern Brazil.....	30
Tabela 8. Significância dos efeitos experimentais e suas interações na produtividade da soja e milho e no resíduo de azevém ao longo dos anos, como resultado da análise de variância (ANOVA).....	40

Tabela 9. Produtividade da soja em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), submetidos a diferentes métodos de pastoreio (contínuo e rotativo) e intensidades de pastejo (moderado e baixa) em cinco anos (2003, 2004, 2006, 2010 e 2014) na região subtropical brasileira.40

Tabela 10. Significância dos efeitos experimentais e suas interações no teor de carbono orgânico solo (COS), nitrogênio total do solo (NTS), na relação carbono/nitrogênio (C/N) e estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo após 14 anos de adoção de um sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) na região subtropical brasileira, como resultado da análise de variância (ANOVA).43

Tabela 11. Média anual de aporte de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo via resíduos culturais em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), submetidos a diferentes sistemas de cultivo (monocultivo – soja/soja e rotação – soja/milho) e intensidades de pastejo (moderada e baixa) no subtrópico brasileiro.45

Tabela 12. Estoque de carbono e nitrogênio no solo (0-30 cm) em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), submetidos a diferentes sistemas de cultivo (monocultivo – soja/soja e rotação – soja/milho) e intensidades de pastejo (moderado e baixo) em uma região subtropical brasileira.45

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figure 1. Annual average precipitation and temperature (2003 to 2017) in a long-term experiment of integrated crop-livestock system in southern Brazil. Source: Experimental Station of the Federal University of Rio Grande do Sul, Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul State, Brazil. 10

Figure 2. Temporal variation of soil pH (**A**), exchangeable aluminum (**B**), base saturation (**C**), aluminum saturation (**D**), exchangeable calcium (**E**), exchangeable magnesium (**F**), available phosphorus (**G**) and available potassium (**H**) affect by different crop system over 14 years in a long-term integrated crop-livestock system experiment from southern Brazil. Red point is equivalent to the beginning in 2003 for the soil layer of 0–10 cm. Red dotted line represents the reference value for soil pH (≥ 5.5) base saturation (≥ 65), aluminum saturation ($\leq 10\%$), phosphorus (30 mg dm^{-3}), potassium (90 mg dm^{-3}), considering a soil with texture containing $\leq 20\%$ of clay and CEC_{pH7} between 7.6 and $15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; and adequate calcium ($4.0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) and magnesium ($1.0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) according to CQFS-RS/SC (2016). Values for year are the overall mean of two crop systems, two grazing intensities, and two stocking methods ($n = 32$). LSD = difference minimal significant $P < 0.05$ by Tukey test. 19

Figure 3. Soil pH in depth affected by cropping systems after 14-years in a long-term integrated crop-livestock system experiment from southern Brazil. Red dotted line represents the reference pH value (5.5) for the diagnostic layer (0–10 cm) for grain cultivation (Group 2), according to CQFS-RS/SC (2016). Values for soil depth are the overall mean of two grazing intensities, and two stocking methods ($n = 16$). Means followed by same capital letter in the row, comparing layers for each crop systems, and means followed by same lowercase letter in the column, comparing crop systems within each soil layer, are not significantly different at $P < 0.05$ by Tukey test. 20

Figure 4. Effective soil cation exchange capacity (CEC) in depth affected by cropping systems (**A**) and grazing intensities (**B**) after 14-years in a long-term integrated crop-livestock system experiment from southern Brazil. Values for soil depth are the overall mean of two grazing intensities, and two stocking methods ($n = 16$) (A); values for soil depth are the overall mean of two crop systems and two stocking methods ($n = 16$) (B). Means followed by same capital letter in the row, comparing layers for each crop systems (A) and grazing intensities (B), and

means followed by same lowercase letter in the column, comparing crop system (A) and grazing intensities (B) within each layer, are not significantly different at $P < 0.05$ by Tukey test.21

Figure 5. Available phosphorus (A) and potassium (B), exchangeable calcium (C) and magnesium (D) in depth after 14-years in a long-term integrated crop-livestock system from southern Brazil. Red dotted line represents the critical contents for the layer (0–10 cm) for phosphorus (30 mg dm^{-3}), potassium (90 mg dm^{-3}), considering a soil of texture class 4 and $\text{CTC}_{\text{pH}7}$ between 7.6 and 15.0, calcium ($4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) and magnesium ($1.0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), according to CQFS-RS/SC (2016). Values for soil depth are the overall mean of two crop systems, two grazing intensities, and two stocking methods ($n = 32$) (A, C e D); Values for soil depth are the overall mean of two grazing intensities, and two stocking methods ($n = 16$) (B). Letters differentiate the nutritional content in depths (A C e D); means followed by same capital letter in the row, comparing layers for each crop systems, and means followed by same lowercase letter in the column, comparing crop systems within each layer (B), are not significantly different at $P < 0.05$ by Tukey test.22

Figure 6. Base saturation (A) and aluminum saturation (B) in depth after 14-years in a long-term integrated crop-livestock system experiment from southern Brazil. Red dotted line represents the reference value for base saturation ($\geq 65\%$) and aluminum saturation ($\leq 10\%$), according to CQFS-RS/SC (2016). Values for soil depth are the overall mean of two crop systems, two grazing intensities, and two stocking methods ($n = 32$). Letters differentiate the saturation in soil layer, are not significantly different at $P < 0.05$ by Tukey test.23

Figure 7. Relationship between base saturation (BS) and aluminum saturation (AS) in the soil after 14-years in a long-term integrated crop-livestock system experiment from southern Brazil. *** Significant at $P < 0.001$24

Figure 8. Schematic representation an integrated crop-livestock system with crop rotation (soybean/maize) and sheep grazing in the winter period and their respective contributions in the average export of nutrients for 14-years.31

Figura 9. Produtividade do milho em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), submetido a diferentes intensidades de pastejo (moderada e baixa) em seis anos (2005, 2007, 2009, 2011, 2013 e 2015), na região subtropical brasileira. Letras maiúsculas comparam as intensidades de pastejo dentro de cada ano. Letras minúsculas comparam cada intensidade nos diferentes anos. Letras diferentes diferenciam-se pelo teste de Tukey a 5%. ...41

Figura 10. Produção total de forragem (PTF) (azevém anual) em sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) em função das intensidades de

pastejo (moderada e baixa). Letras diferentes diferenciam a média dos anos avaliados em função das intensidades de pastejo, pelo teste de Tukey a 5%. ...41

Figura 11. Massa de forragem residual (MFR) (azevém anual) em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), submetido a diferentes sistemas de cultivo (monocultivo – soja/soja e rotação – soja/milho) e intensidades de pastejo (moderada e baixa) por cinco anos (2010, 2011, 2012, 2013 e 2014) na região subtropical brasileira. Letras diferentes comparam os sistemas de cultivo (monocultivo e rotação) e as intensidades de pastejo (moderada e baixa) pelo teste de Tukey a 5%.42

Figura 12. Efeito da interação entre sistema de cultivo (monocultivo – soja/soja e rotação – soja/milho) e profundidade para os teores de carbono orgânico no solo (COS) **(A)**, nitrogênio total no solo (NTS) **(C)** e relação carbono/nitrogênio **(E)**. Efeito da intensidade de pastejo (moderada e baixa) e profundidade para os teores de COS **(B)** e NTS **(D)**. Quando identificada interação, letras maiúsculas comparam o tratamento dentro de cada profundidade. As letras minúsculas comparam entre profundidades cada tratamento, com um nível de significância de 5%, pelo teste de Tukey.44

Figura 13. Relação entre entrada anual de N via resíduos culturais e estoques de C em diferentes sistemas de cultivo (monocultivo – soja/soja e rotação – soja/milho) após 14 anos da adoção de um sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) na região subtropical brasileira. ** Significativo a $P < 0,01$. * Significativo a $P < 0,05$46

CAPÍTULO I – Introdução geral

Cada vez mais busca-se sistemas sustentáveis, tanto do ponto de vista produtivo e econômico, como ambiental. Nesse sentido os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) são reconhecidos pelas suas contribuições para a melhoria na produção agrícola, uma vez que intensificam de forma sustentável a produção de alimentos, além de promover melhorias na qualidade do solo.

Dessa forma, o objetivo dessa dissertação foi verificar qual melhor arranjo de SIPA é mais eficiente no uso dos nutrientes e no acúmulo de carbono e nitrogênio no solo. O terceiro capítulo dessa dissertação avaliou as propriedades químicas do solo ao longo do tempo, de 2003 até 2017, a distribuição vertical das propriedades químicas do solo em 2017, e o balanço de nutrientes no solo após 14 anos de condução do experimento.

No quarto capítulo foram avaliados os teores e estoques de carbono e nitrogênio no solo em 2017, após 14 anos da adoção de diferentes métodos e intensidade de pastejo no inverno, além de diferentes sistemas de cultivo adotados no verão. Nesse capítulo também são apresentadas e discutidas as produtividades de milho e soja, além dos resíduos de pasto (azevém) durante os anos de condução do experimento. Por fim, é apresentada as considerações finais da dissertação, englobando esses dois capítulos.

CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica

Os SIPA, mais conhecidos na literatura técnica como integração lavoura-pecuária (ILP), são importante ferramenta afim de promover maior intensificação e diversificação do uso da terra (Carvalho et al., 2014). Esses são definidos como sistemas onde há alternância temporária ou rotação do cultivo de grãos e pastejo de animais na mesma área, ao longo do tempo (Moraes et al., 2014), e são vistos como uma via de intensificação sustentável e viável economicamente para produção de alimentos (Russelle et al., 2007; Allen et al., 2007; FAO, 2010; Lemaire et al., 2014). Sendo que o Rio Grande do Sul conta com o segundo maior rebanho de ovinos do Brasil, com cerca de 3,4 milhões de animais (IBGE, 2017) e a terceira maior área cultivada com grãos (CONAB, 2018) isso se torna uma alternativa de melhor uso da terra, aumentando a eficiência produtiva. Além disso, os SIPA possuem inúmeras vantagens, pois possibilitam altas produtividades, garantindo renda ao produtor rural e, ao mesmo tempo, conservam os recursos naturais e contribuem para o aumento da resiliência climática e econômica do setor agrícola (Peyraud et al., 2014).

Os SIPA podem potencializar a ciclagem dos nutrientes e intensificar a produção de alimentos por unidade de insumos utilizados, promovendo maior sustentabilidade e eficiência no uso dos recursos naturais (Carvalho et al., 2014). Segundo Anghinoni et al. (2013), isso se deve, em grande parte, aos animais em pastejo, que modificam os fluxos dos nutrientes entre o solo, a planta e a atmosfera, devido à dinâmica diferenciada de crescimento da espécie forrageira.

Nesse contexto, o solo é o principal compartimento centralizador dos diversos processos sinérgicos ocorrentes no sistema. Enquanto os

diferentes componentes vegetais incorporam nutrientes e energia, os animais funcionam como catalisadores ao introduzirem variabilidade e novas vias de fluxos de nutrientes e água, onde o solo é o compartimento mediador dos processos (Anghinoni et al., 2013). Daí a importância de se avaliar o solo em experimentos de longo prazo que adotam diferentes arranjos de SIPA. Tais avaliações dão subsídio ao entendimento de processos ocorrentes nos diferentes arranjos temporais e espaciais das fases lavoura e pecuária. Um dos principais ganhos observados nos SIPA é a maior ciclagem de nutrientes (Anghinoni et al., 2013; Entz et al., 2005). Estudos tem demonstrado que áreas com pastejo de bovinos com intensidade moderada melhoram o desenvolvimento da pastagem, intensificando o processo de ciclagem de P e K no sistema (Assmann et al., 2017). Em um SIPA, a disponibilidade de nutrientes no solo é constante, uma vez que existem diferentes fontes em decomposição (resíduos de plantas e dejetos animais), com liberação de nutrientes de forma e em tempos distintos entre as diferentes fontes (Anghinoni et al., 2013; Assmann et al., 2015), aumentando inclusive os teores de carbono orgânico no solo (COS) em comparação a cultivos agrícolas contínuos (Boeni et al., 2014).

Independente do arranjo produtivo, a rotação de culturas assume papel importante, pois possibilita a alternância de plantas com diferentes exigências nutricionais e habilidades na absorção de nutrientes, aumentando a ciclagem e diminuindo as perdas de P e K no solo (Tiecher et al., 2017). A utilização de plantas que possuam diferentes estratégias de absorção e de exploração de nutrientes no perfil do solo os tornam mais disponíveis, em função do processo de ciclagem de nutrientes (Borkert et al., 2003), e aportam diferentes fontes de resíduos ao solo, favorecendo o acúmulo de carbono (Havlin et al et al., 1990). Tratando-se da rotação de gramíneas com leguminosas, ambas possuem um papel fundamental, a primeira pela representatividade do aporte de resíduos ao sistema e, a segunda, pela qualidade do resíduo aportado, em geral com menores relações C/N, C/P, lignina/N e lignina/P (Yadava & Thodan, 1997; Russelle & Birr, 2004).

Além dos fatores supracitados, a mínima exportação de nutrientes pelo animal é um componente essencial da ciclagem de nutrientes. Em áreas de pastejo de ovinos, por exemplo, cerca de 90% dos nutrientes ingeridos

pelos animais via consumo do pasto retornam ao solo (Haynes & Williams, 1993). Além disso, a ingestão de forragem pelos animais ainda estimula o crescimento radicular das plantas (Reeder & Schuman, 2002), contribuindo para a maior absorção e ciclagem dos nutrientes que estão em camadas mais profundas do solo.

O manejo da altura do pasto contrastado a áreas sem pastejo no inverno determina variação nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (Carvalho et al., 2010), e por isso é um fator determinante para o sucesso dos SIPA e decisivo para a obtenção de muitos dos seus benefícios. Nesse contexto, sabe-se que uma carga animal moderada, mantendo-se pastagens de inverno, como azevém (*Lolium multiflorum*) e aveia-preta (*Avena sativa*), com altura entre 20 e 30 cm, pode contribuir para a melhoria da qualidade do solo. Foram encontradas melhorias na qualidade biológica do solo (Souza et al., 2008), para o aumento no acúmulo de C e N orgânico no solo (Souza et al., 2008; Assmann et al., 2014), para o aumento da disponibilidade de P (Deiss et al., 2016), para a diminuição da acidificação e para o aumento da correção da acidez na subsuperfície do solo (Flores et al. 2008; Martins et al., 2014), mantendo a condição física do solo com propriedades adequadas ao crescimento da cultura de grãos em sucessão (Flores et al., 2007; Conte et al., 2011; Cecagno et al., 2016), sem afetar a produtividade da cultura de grãos de verão.

Além do manejo da altura do pasto, outro componente da fase pecuária do SIPA a ser considerado é o método de pastoreio. De acordo com Lunardi et al. (2008), o método de pastoreio pode ser tão importante quanto a intensidade de pastejo definida. Enquanto o método de pastoreio em lotação contínua explora o poder seletivo dos animais, permitindo seu acesso a toda área e, conseqüentemente, distribuição aleatória dos dejetos, a lotação rotacionada se caracteriza pelo maior controle local e por elevadas densidades instantâneas de animais por unidade de área. Por isso, o método de pastoreio pode afetar os padrões espaciais dos atributos do solo através da utilização da pastagem, promovendo a heterogeneidade espacial do ambiente pelos distintos fatores microambientais ofertados, incluindo água, luz e nutrientes (Laca, 2009).

A principal fonte de variação ocorre pela distribuição de fezes e urina, os quais são depositados de forma inconstante e desuniforme, influenciando a concentração de nutrientes (Augustine & Frank, 2001; McNaughton, 1982). Aliado a isso, os animais podem indiretamente influenciar a distribuição espacial das características do solo pela mudança dos padrões de vegetação (Olofsson, 2008). Contudo, a escolha de um método de pastoreio, contínuo ou rotacionado, não altera a massa de forragem total produzida de azevém (Neto, et al., 2013). Como não há diferença na quantidade de resíduos aportados, a ciclagem de nutrientes no sistema é possivelmente semelhante entre os métodos de pastoreio, e por isso espera-se uma distribuição vertical e estoque de nutrientes similar entre os métodos.

Dessa forma hipotetiza-se que sistemas integrados de produção de grãos e ovinos de corte que incluam rotação de culturas na fase lavoura, intensidade de pastejo baixa e pastoreio rotativo promovem melhorias nos atributos químicos do solo, produtividade das culturas, estoques de carbono, e um balanço menos negativo de nutrientes no solo. Assim, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o impacto de longo prazo da intensidade e métodos de pastoreio, e de sistemas de cultivo com monocultivo de soja e rotação de soja/milho, sobre a produtividade das culturas, os atributos químicos do solo, o balanço e o estoque de nutrientes em um Plintossolo do Sul do Brasil sob sistemas integrados de produção de grãos e ovinos de corte.

CAPÍTULO III: 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 Brazil³

1. Introduction

Brazil is one of the largest grain producers in the world and has the fifth largest cultivated area. Moreover, Brazil is among the 17 largest producers of sheep in the world. In the last year (2017/2018) 61.5 million hectares were cultivated with commercial crops. In Rio Grande do Sul, the southernmost state of Brazil, with the third largest agricultural production, the crop area is approximately 6.5 million hectares, mainly cultivated with soybean (89% of the area) and maize (11% of the area). Rio Grande do Sul State also has the largest sheep flock in Brazil, with approximately 4.0 million head mainly managed for mutton production. However, in the winter period only 1.0 million hectares (about 16% of the entire agricultural area) are cultivated with commercial crops such as wheat (CONAB, 2018). This underutilization of the areas in winter is mainly due to the low prices paid for the products and the competition with the better-quality Argentinean wheat (Brum & Müller, 2008), which makes the activity often unfeasible from an economic point of view. The rest of the area remain fallow or with cover plants with high forage value, underutilizing the potential of land use.

Among these arable areas, approximately 5.4 million hectares have great productive potential. A viable alternative to optimize the use of the soil in the winter period is the adoption of integrated crop-livestock systems

³ Published *Geoderma*, 351, 197-208, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.036>

(ICLS)(Carvalho et al., 2014). They are defined as systems in which there is temporary alternation or rotation of pastures and crops in the same area over time (Moraes et al., 2014), and they are seen as sustainable intensification routes with economic viability for food production (Russelle et al., 2007; Allen et al., 2007; FAO, 2010; Lemaire et al., 2014). Since Rio Grande do Sul has the second largest flock of sheep in Brazil, with 3.4 million animals (IBGE, 2017) and the third largest area planted with grains (CONAB, 2018), this becomes an alternative better use of land, increasing productive efficiency.

The ICLS presents a number of benefits, since they guarantee high crop yields, diversifying the income for farmers and, at the same time, preserving the natural resources, contributing to the increase of the climatic and economic resilience of the agricultural sector (Peyraud et al., 2014). These systems differ from purely agricultural systems, mainly by enhancing nutrient (re) cycling and increasing food production per unit of area and inputs used, promoting greater efficiency in the use of fertilizers and natural resources (Entz et al., 2005; Carvalho et al., 2014). This is due mainly to the presence of the animal grazing, which modifies the nutrient fluxes in the soil, plant, and atmosphere interface (Anghinoni et al., 2013).

In this context, soil is the main centralizing compartment of the various synergic processes that occur in the system. While the different plant components incorporate nutrients and energy, the animals act as catalysts by introducing variability and new pathways of nutrient and water flows (Anghinoni et al., 2013). Studies in ICLS are still scarce although they have increased representatively in recent years (Moraes et al., 2014). However, they are extremely necessary to understand the change in the dynamics of nutrient fluxes, and consequently the soil fertility, affected by both the animals and the grain crops. Therefore, the evaluation of long-term experiments, which rely on the adoption of different ILCS arrangements, are significant. Assessments of this dimension support the understanding of processes that occur in the different temporal and spatial arrangements of the crop and livestock phases.

The extent to which the processes and nutrient fluxes are affected will depend on the grain crop inserted in the cropping season and the management of the animals in the pasture phase. The intensity, frequency, and mode of conduction of the animals directly affect the vegetation pattern of the

pasture and, consequently, the nutrient cycling. Recent studies have shown that areas under pasture grazing at suitable intensities improve pasture development, enhancing the phosphorus (P) and potassium (K) cycling process in the system (Assmann et al., 2017). In addition, moderate animal loads in winter pastures of ryegrass and black oats may contribute to the improvement of soil biological quality (Souza et al., 2008), to the increase of organic carbon (C) and nitrogen (N) accumulation (Souza et al., 2008; Assmann et al., 2014), increase in P availability (Deiss et al., 2016), decrease of acidification and increase of acidity correction in the soil subsurface (Flores et al. 2008; Martins et al., 2014), maintaining adequate physical conditions of soil to the growth of the grain crops in succession (Flores et al., 2007; Conte et al., 2011; Cecagno et al., 2016) without affecting the productivity of the summer crop.

In addition to the management of the sheep load, another component of the livestock phase of the ICLS to be considered is the stocking method, which can affect the chemical properties of the soil as well as the grazing intensity used (Lunardi et al., 2008). Grazing may affect spatial patterns of soil attributes, increasing the spatial heterogeneity of the environment by different microenvironmental factors, including water, light, and nutrients (Laca, 2009). The main source of variation is the distribution of feces and urine, deposited inconsistently and unevenly, influencing nutrient concentration (McNaughton, 1982; Augustine & Frank, 2001). Moreover, sheep can indirectly influence the spatial distribution of soil characteristics by changing vegetation patterns imposed by influence of selectivity in grazing (Olofsson, 2008).

Crop rotation is another important factor to consider in the diversification of ICLS arrangements, since it allows the alternation of plants with different nutritional requirements and nutrient absorption abilities, which can increase the cycling and reduce losses of P and K (Tiecher et al., 2017), as well improve soil quality (Karlen et al., 2006). The use of plants that have different strategies of absorption and exploitation of nutrients in the soil profile increase nutrient availability due to the process of nutrient cycling (Borkert et al., 2003). In this context, the cultivation of maize in rotation with soybean in the summer is an important strategy to obtain the benefits of crop rotation, mainly because they present different production potentials, root systems, waste inputs, among others (Borkert et al., 2003; Russelle & Birr, 2004).

Thus, the present study was carried out with the objective of evaluating the impact of the intensity and frequency of the sheep grazing in the winter period and the crop 7 rotation in the summer period on the (i) temporal evolution and vertical distribution of soil chemical properties, and (ii) on the nutrient (P, K, Ca, and Mg) budget in the profile of an Acrisol, conducted for 14 years under integrated crop livestock system in the Brazilian subtropics.

2. Material and methods

2.1. History of the experimental area

The study was carried out in a long-term experiment established in 2003 at the Agronomic Experimental Station (EEA) of the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), located in Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil (latitude 30°05'S, longitude 51°39' O and altitude of 46 m). The climate is classified as subtropical humid (Cfa), according to the classification of Köppen (Kottek et al., 2006). The average annual precipitation since the beginning of the experiment ranged from 1200 to 2000 mm, and the average monthly temperature of the last 14 years was 19°C (**Figure 1**).

The soil is classified as Acrisol (FAO, 2006) whose chemical properties before the installation of the experiment (2003) at the soil layer of 0-10 cm were: organic carbon content of 17 g kg⁻¹, pH-H₂O (1:1 soil/water ratio) of 5.3; exchangeable aluminum (Al), calcium (Ca) and magnesium (Mg) (extracted by KCl 1.0 mol L⁻¹) of 0.3, 2.2 and 1.2 cmol_c dm⁻³, respectively; available P and K (extracted by Mehlich 1) of 10 and 135 mg dm⁻³, respectively; and base and Al saturation of 51% and 8%, respectively; and the soil bulk density was 1.62 g cm⁻³.

Prior to the implementation of the experiment, the area was covered with natural grassland, with the insertion of exotic species such as ryegrass (*Lolium multiflorum*) during the winter period. The entire area was desiccated with herbicide of the active ingredient *glyphosate*. In addition, lime was applied at a dose of 1.0 Mg ha⁻¹ to raise the soil pH of the 0-10 cm soil layer up to 6.0, and fertilization was performed with 10 kg N ha⁻¹, 40 kg P₂O₅ ha⁻¹ and 40 kg

$\text{K}_2\text{O ha}^{-1}$, to meet an expected grain yield of 3.0 Mg ha^{-1} of soybean (CQFS-RS/SC, 1995).

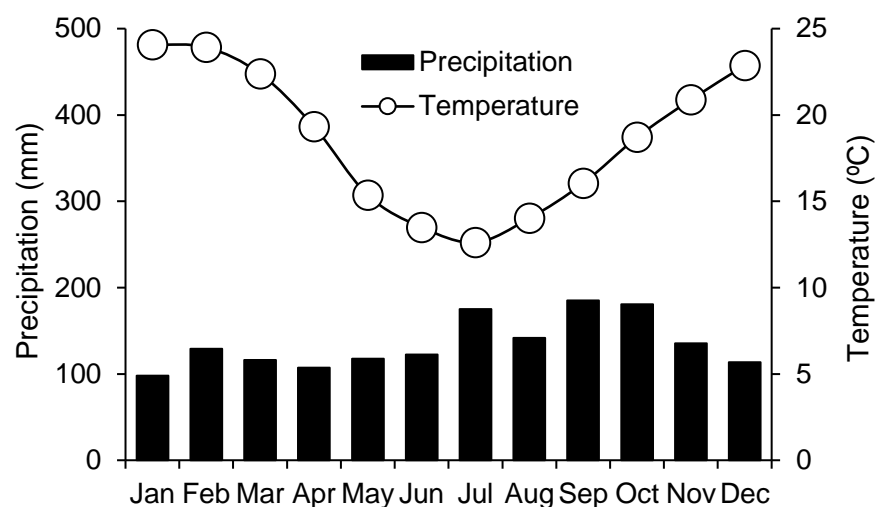


Figure 1. Annual average precipitation and temperature (2003 to 2017) in a long-term experiment of integrated crop-livestock system in southern Brazil. Source: Experimental Station of the Federal University of Rio Grande do Sul, Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul State, Brazil.

2.2. Experimental design and conduction of the experiment

The experiment was started with direct sowing of ryegrass with 17 cm row spacing, and sowing density of 32 kg ha^{-1} . Nitrogen fertilization was 150 kg N ha^{-1} , fractionated in two applications. In the winter period, grazing was carried out with young sheep with 9 months old. A variable number of regulators was used through the *put-and-take* technique (Mott and Lucas, 1952).

The experiment, with a total area of 4.8 hectares, is divided into 16 plots, with areas varying from 0.23 to 0.41 ha. The experimental design was of randomized blocks, with four replications, in a 2×2 factorial system with subdivided plots. The two main factors are two sheep grazing intensities (moderate and low) and two sheep stocking methods (continuous and rotating) and the subdivided plots represent two summer cropping systems (monoculture and rotation).

The different intensities of sheep grazing were defined by means of the forage supply, expressed in kg of dry matter (DM) per 100 kg of live weight

(LW) per day, as follows: (i) moderate grazing intensity - forage supply equivalent to 2.5 times the potential forage intake by sheep; and (ii) low grazing intensity - supply equivalent to 5.0 times the consumption potential. According to the National Research Council (1985), the forage consumption potential of sheep is 4.0%, based on DM, and, therefore, the moderate supply equals 10% of the LW and a 20% of LW.

Table 1. Amount of nutrients added via fertilizers in winter (ryegrass) and summer (soybean or maize) seasons over 14-years (from 2003 to 2016) in a long-term integrated crop-livestock system experiment in southern Brazil.

Year	Season	Nutrient (kg ha ⁻¹)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
2003	Winter	160	40	40
	Summer	20	80	80
2004	Winter	165	60	60
	Summer	15	60	60
2005	Winter	150	60	60
	Summer	0	0	0
2006	Winter	105	60	60
	Summer	0	0	0
2007	Winter	105	60	60
	Summer	0	0	0
2008	Winter	205	60	60
	Summer	0	0	0
2009	Winter	0	0	0
	Summer	110	120	60
2010	Winter	150	0	0
	Summer	0	60	60
2011	Winter	180	80	80
	Summer	150	0	0
2012	Winter	150	0	0
	Summer	0	0	0
2013	Winter	90	60	60
	Summer	0	0	0
2014	Winter	75	0	0
	Summer	0	0	0
2015	Winter	160	60	60
	Summer	0	0	0
2016	Winter	150	60	60
	Summer	0	0	0
Average per year		150	65	60
Total		2142	920	860

The stocking methods were differentiated by the length of permanence of the animal in each plot. In the continuous stocking method, the animals remain in the same area during the entire grazing period, and in rotational grazing the plots are subdivided, and the animals are rotated, remaining approximately two days in each grazing range. In the summer, each

plot, subdivided into sub-plots, receives two distinct cultivation systems, monoculture (soybean / soybean) and crop rotation (soybean / maize), with no-tillage seeding. Thus, the experiment has a total of 32 experimental units (4 blocks \times 2 stocking methods \times 2 grazing intensities \times 2 cropping systems).

The height of the pasture was monitored biweekly with a sward stick (Barthram, 1985), at 50 points in the continuous stocking plots and at ten points in each grazing plot in the rotational stocking plots. Different periods of load adjustment were adopted to maintain a forage supply of 2.5 and 5.0 times the consumption potential. This management was adopted during all pasture periods, from 2003 to 2016.

At the end of each grazing period, the sheep were removed, and the area desiccated with *glyphosate* herbicide for later sowing of the summer crop. In the first cycle, soybean (*Glycine max*) was sown throughout the experiment, while in the second cycle this crop was sown in half of the plot and maize in the other half (monoculture and rotation subplots, respectively), with 45 cm of row space and a population of 280,000 plants ha⁻¹. The fertilization performed each year is presented in **Table 1**.

2.3. Temporal evaluation of soil chemical properties

For this assessment, historical soil data series of the experimental area in the years 2010, 2013 and 2017 in the 0-20 cm soil layer were used. Moreover, we also used as the initial reference data from the 0-10 cm soil layer in 2003, but these data were not entered in the statistical analysis. These data were obtained in soil samples dried in a forced air circulation oven at 50°C and then ground, passed in a 2 mm sieve, and stored. The chemical attributes used for the temporal evaluation were pH in water, available P and K extracted by Mehlich-1, exchangeable Al, Ca, and Mg extracted by 1.0 mol L⁻¹ KCl, and base and Al saturation. All analyses were performed following the methodology described by Tedesco et al. (1995). The exchangeable Al³⁺ was determined by titration with 0.0125 mol L⁻¹ NaOH solution; Ca²⁺ and Mg²⁺ by atomic absorption spectrometry; K by flame photometry and P by photocolometry (Tedesco et al., 1995). The potential acidity (H+Al) was obtained through the equation

proposed by Kaminski et al. (2001) (equation 1) and adopted by CQFS-RS/SC (2016):

$$H^+ + Al^{3+} = e^{10.665 - 1.1483 \cdot pH \cdot SMP/10} \quad \text{Equation 1}$$

where H+Al is estimated by the pH of equilibrium between soil and the solution with SMP 1.78 mol L⁻¹ (triethanolamine, paranitrophenol, K₂CrO₄, Ca(CH₃COO)₂ and CaCl₂·2H₂O) calibrated at pH 7.5 (Shoemaker et al. , 1961). The sum of bases (SB) was determined by the sum of Ca, Mg, and K. The cation exchange capacity at pH 7.0 (CEC_{pH7.0}) was calculated by SB + (H+Al); the base saturation (V) was calculated using the relation: V (%) = 100 × SB/CEC_{pH7.0}; and the saturation by Al (m) was obtained by the relation: m (%) = [Al/(SB+Al)] × 100 (CQFS-RS/SC, 2016).

2.4. Evaluation of the vertical distribution of acidity and soil nutrient availability

In July 2017, soil samples were collected up to 40 cm depth, stratified into five layers (0-5, 5-10, 10-20, 20-30, and 30-40 cm), totaling 160 samples. Samples were collected with a shovel blade, up to 20 cm, and with a soil auger from 20 to 40 cm. The samples were dried in a forced air circulating oven at 50° C and then ground, passed in a 2 mm sieve, and stored. The soil bulk density was 1.50, 1.64, 1.72, 1.61, and 1.65 g cm⁻³ for the soil layers of 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, and 30-40 cm. The chemical properties evaluated were the same described in the section 5.3.1.

2.5. Nutrient budget

To calculate the nutrient budget, all inputs of nutrients (P, K, Ca, and Mg) via fertilizer and all exits exported by grains (maize and soybean) and sheep meat were quantified. For this, the historical data of animal and vegetal production measured in the experiment were used. Exports of P and K by soybean and maize grains were calculated using the mean values adopted by CQFS-RS/SC (2016): 6.1 kg P Mg⁻¹ and 16.6 kg K Mg⁻¹ of grain yield for

soybean, and 3.5 kg P Mg⁻¹ and 5.0 kg K Mg⁻¹ of grain yield for maize. The values of Ca and Mg exported by soybean grains used were 2.2 and 2.3 kg Mg⁻¹ of grain yield, respectively. For the maize reference values of 2.4 and 2.1 kg Mg⁻¹ of grain yield were used for Ca and Mg, respectively (Houx III et al., 2016). The export of nutrients by meat was calculated based on values proposed by Williams (2007), considering the export of 1940 mg of P, 3440 mg of K, 72 mg of Ca and 280 mg per kilogram of meat produced.

The nutrient budget in the soil was calculated considering the initial and final soil contents, using the available P and K contents and exchangeable Ca and Mg for the 0-10 cm soil layer, as presented in **equation 2**:

$$SB = FS - IS \quad \text{Equation 2}$$

where: SB = soil budget, FS = final soil content in 2017 and IS = initial soil content in 2003.

The effective budget of nutrients in the soil was calculated considering the initial and final levels in the soil layer of the 0-10 cm, in addition to all inputs, via fertilizer, and the exits, via meat and grain, as presented in **equation 3**:

$$EB = (FS - IS) - (IF - OGM) \quad \text{Equation 3}$$

where: EB = effective budget, FS = final soil content in 2017, IF = inputs via fertilizer from 2003-2017 and OGM = outputs via grain and meat from 2003-2017.

2.6. Statistical analysis

Statistical analysis was performed with SAS® 9.4 software, and the results were subjected to the normality analysis by the Shapiro-Wilk test and the homogeneity of variances by the Levene test, both at a significance level of 5%. Subsequently, the analysis of variance (F test) was applied and, when significant ($p < 0.05$), the means of the treatments were compared by the Tukey multiple comparisons test, at a significance level of 5%. For the evaluation of

the variance analysis and test of means the following statistical models were used:

(i) Temporal evolution of chemical properties of soil fertility:

$$y = \mu + B_i + e_i + S_j + G_k + (SG)_{jk} + e_{k(ij)} + C_l + (SC)_{jl} + (GC)_{kl} + e_{kj(il)} + (SGC)_{jkl} + Y_m + e_{im} + (SY)_{jm} + (GY)_{km} + (CY)_{lm} + (SGY)_{jkm} + (SCY)_{jlm} + (GCY)_{klm} + (SGCY)_{jklm} + e_{ijklm}$$

where: y = variable response, μ = overall average of observations, B_i = block effect ($i = 1, 2, 3, 4$), S_j = stocking methods ($j = 1, 2$), G_k = grazing intensity ($k = 1, 2$), C_l = crop systems ($l = 1, 2$), Y_m = year ($m = 1, 2, 3$) and e_{ijklm} = effect of random error.

(ii) Vertical distribution of chemical properties of soil fertility:

$$y = \mu + B_i + e_i + S_j + G_k + (SG)_{jk} + e_{k(ij)} + C_l + (SC)_{jl} + (GC)_{kl} + e_{kj(il)} + (SGC)_{jkl} + L_m + e_{im} + (SL)_{jm} + (GL)_{km} + (CL)_{lm} + (SGL)_{jkm} + (SCL)_{jlm} + (GCL)_{klm} + (SGCL)_{jklm} + e_{ijklm}$$

where: y = variable response, μ = overall average of observations, B_i = block effect ($i = 1, 2, 3, 4$), S_j = stocking methods ($j = 1, 2$), G_k = grazing intensity ($k = 1, 2$), C_l = crop systems ($l = 1, 2$), L_m = soil layer ($m = 1, 2, 3, 4, 5$) and e_{ijklm} = effect of random error.

(iii) Soil nutrient budget:

$$y = \mu + B_i + e_i + S_j + G_k + (SG)_{jk} + e_{k(ij)} + C_l + (SC)_{jl} + (GC)_{kl} + e_{kj(il)} + (SGC)_{jkl} + e_{ijklm}$$

where: y = variable response, μ = overall average of observations, B_i = block effect ($i = 1, 2, 3, 4$), S_j = stocking methods ($j = 1, 2$), G_k = grazing intensity ($k = 1, 2$), C_l = crop systems ($l = 1, 2$) and e_{ijklm} = effect of random error.

3. Results and discussion

3.1. Temporal evolution of chemical properties of soil fertility

The soil chemical properties changed during the 14 years of the experiment but were not affected by the grazing intensity and the stocking method (**Table 2**). Except for pH, which had an effect of interaction between crop rotation systems and years, all other attributes evaluated were not affected by the different ICLS arrangements adopted (winter stocking methods and intensities and summer crop rotation) (**Table 2**).

There was an intense acidification of the soil in the 0-20 cm layer over the experimental period. From 2010 to 2017, in only 7-years, the soil pH in water decreased from 4.9 to 4.0 (**Figure 2A**), which was accompanied by an increase in Al saturation of 14% to 50% (**Figure 2D**) and a decrease in base saturation from 35% to only 18% (**Figure 2C**). These values are far from the reference values recommended by CQFS-RS/SC (2016) (pH in water ≥ 5.5 , base saturation $\geq 65\%$ and Al saturation $\leq 10\%$ for a soybean/maize production system conducted in consolidated no-tillage).

Soil pH decreased by an average of 0.13 units per year in the 0-20 cm soil layer from 2010-2017 (**Figure 2A**). This acidification is mainly related to the addition of approximately $150 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ (**Table 2**). In well aerated soils, most of the N coming from this fertilizer undergoes nitrification process, forming nitrate ions (NO_3^-) and, when it is not uptake by the plants, can be leached in the soil. In this process, there is a surplus of H^+ , which acidify the soil. In a meta-analysis, Tian and Niu (2015) verified that the addition of doses greater than 150 kg N ha^{-1} as urea generated, on average, a reduction of 0.4 pH units per year. Corroborating with the results of the present study, Tian and Niu (2015) found a decrease of 0.2 pH units per year in long-term studies (10 and 20 years). In addition, in the leaching of NO_3^- , there is the loading of basic cations, such as Ca, Mg and K, to deeper soil layers, accentuating the process of soil acidification from the surface, with a decrease in soil pH and base saturation and increased Al saturation (Bolan & Hedley, 2003; Crusciol et al., 2011).

The intense acidification over time caused an increase in Al levels and a decrease in Ca, Mg and K levels in the soil (**Figures 2B, 2E, 2F and 2H**), due to the losses of these cations concomitantly with the losses of NO_3^- (Crusciol et al., 2011). These cations present low chemical interaction with the solid phase of the soil compared to Al (Sparks, 2003), becoming more

susceptible to subsurface layers below 20 cm depth. Similar effects were also identified by several authors (Cai et al., 2015; Chen et al., 2015; Lucas et al., 2011; Hoegberg et al., 2006), evaluating the effects of adding N fertilizer over time in chemical properties of soil.

The uptake of basic cations by grain crops is another important and natural factor that acts on soil acidification over time. The exudation of acid organic compounds by the roots also increases the concentration of H⁺ ions, reducing the pH of the environment (Hinsinger et al., 2003). In addition, the extraction and subsequent export of nutrients via grains by crops have an important role in the soil acidification process, due to the reduction of base saturation, especially when there is no replacement of these nutrients. During the period of conduction of the experiment, Ca and Mg were not supplied through liming, resulting in a marked decrease in the nutrient contents in the 0-20 cm soil layer from 2010 to 2017 (**Figure 2E and 2F**), from 1.9 to 1.0 cmol_c dm⁻³ for Ca, and from 0.9 to 0.5 cmol_c dm⁻³ for Mg, with a consequent decrease in base saturation (**Figure 2C**). These values are below the levels considered suitable for the cultivation of annual cash crops in the study region (4.0 and 1.0 cmol_c dm⁻³ for Ca and Mg, respectively - CQFS-RS/SC, 2016).

Among the evaluated nutrients, the only one that increased over time was P (**Figure 2G**). At the experimental establishment in 2003, the initial content was 13 mg dm⁻³ in the 0-10 cm soil layer. In 2010, the P content in the 0-20 cm soil layer was 52 mg dm⁻³ and it increases up to 79 mg dm⁻³ seven years later in 2017, well above the critical level recommended by CQFS-RS/C (2016), which is 30 mg dm⁻³. The current P content is extremely high, even exceeding the environmental critical limit (40 + clay content [17%] = 57) described by Gatiboni et al. (2015). This value represents a high risk of contamination of aquatic environments with P, increasing the potential of eutrophication. The increase in soil available P content over time was due to the application of phosphate fertilizers above the amount demanded and exported by crops and animals (Boitt et al., 2008; Whalen & Chang, 2001). The P, as a low mobile nutrient in the soil, accumulates in surface. This effect is evidenced mainly in long-term no tillage systems, where there is no soil disturbance (Rheinheimer et al., 2002; Rheinheimer & Anghinoni, 2003; Tiecher et al., 2017).

Table 2. Significance of the effects of experimental factors and their interactions on soil chemical properties over 14-years (from 2003 to 2016) in a long-term integrated crop-livestock system experiment in southern Brazil, as resulting from analysis of variance (ANOVA).

Variable	S ^a	G ^b	C ^c	Y ^d	S × G	S × C	G × C	S × G × C	S × Y	G × Y	C × Y	S × G × Y	S × C × Y	S × G × C × Y
Soil pH	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
Base saturation	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Aluminum saturation	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Exchangeable Ca	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Exchangeable Mg	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Available P	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Available K	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

^a Stocking method; ^b Grazing intensity; ^c Crop system; ^d Year. * Significant at $P < 0.05$; ** Significant at $P < 0.01$; *** Significant at $P < 0.001$; ns not significant.

Table 3. Significance of the effects of experimental factors and their interactions on soil chemical properties after 14-years of a long-term integrated crop-livestock system experiment in southern Brazil, as resulting from analysis of variance (ANOVA).

Variable	S ^a	G ^b	C ^c	D ^d	S × G	S × C	G × C	S × G × C	S × D	G × D	C × D	S × G × D	S × C × D	S × G × C × D
Soil pH	ns	ns	**	***	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	**	ns	ns	ns
Base saturation	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Aluminum saturation	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Exchangeable Ca	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Exchangeable Mg	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Available P	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Available K	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Effective CEC	ns	ns	**	***	ns	ns	ns	Ns	ns	*	*	ns	ns	ns

^a Stocking method; ^b Grazing intensity; ^c Crop systems; ^d Depth. * Significant at $P < 0.05$; ** Significant at $P < 0.01$; *** Significant at $P < 0.001$; ns not significant.

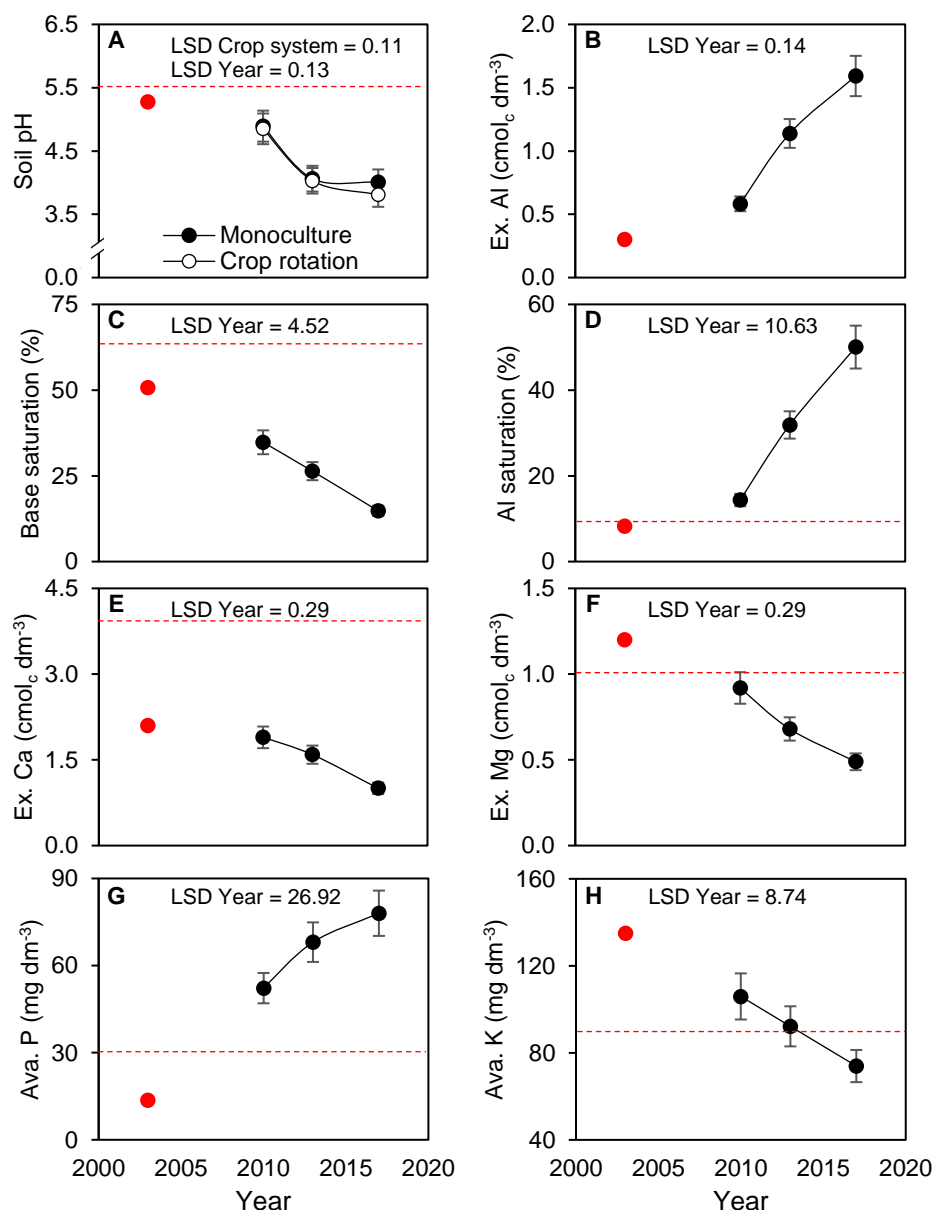


Figure 2. Temporal variation of soil pH (A), exchangeable aluminum (B), base saturation (C), aluminum saturation (D), exchangeable calcium (E), exchangeable magnesium (F), available phosphorus (G) and available potassium (H) in the 0–20 cm soil layer affect by different crop system over 14 years in a long-term integrated crop-livestock system experiment from southern Brazil. Red point is equivalent to the beginning in 2003 for the soil layer of 0–10 cm. Red dotted line represents the reference value for soil pH (≥ 5.5) base saturation (≥ 65), aluminum saturation ($\leq 10\%$), phosphorus (30 mg dm^{-3}), potassium (90 mg dm^{-3}), considering a soil with texture containing $\leq 20\%$ of clay and $\text{CEC}_{\text{pH}7}$ between 7.6 and $15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; and adequate calcium ($4.0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) and magnesium ($1.0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) according to CQFS-RS/SC (2016). Values for year are the overall mean of two crop systems, two grazing intensities, and two stocking methods ($n = 32$). LSD = difference minimal significant $P < 0.05$ by Tukey test.

3.2. Vertical distribution of chemical properties of soil fertility

Except for soil pH, which had an effect of the interaction of the crop rotation system and soil depth, and the effective CEC, which presented interaction of both grazing intensities and crop rotation with soil depth, the other variables presented only significant effect of soil depth (**Table 3**).

The soil pH values are classified as extremely low (CQFS-RS/SC, 2016), especially in the surface layer, with an average of 3.9. The pH increases in depth, being higher in the soybean monoculture in relation to the soybean-maize rotation, with values 4.1 and 3.9, respectively, in the 20-40 cm layer (**Figure 3**). This is possibly due to the additional application of 260 kg N ha⁻¹ as urea for maize fertilization in the crop rotation treatments (**Table 2**), demonstrating the acidification potential of this fertilizer in agricultural and forest productive systems (Tian and Niu, 2015; Mao et al., 2017; Cai et al., 2015).

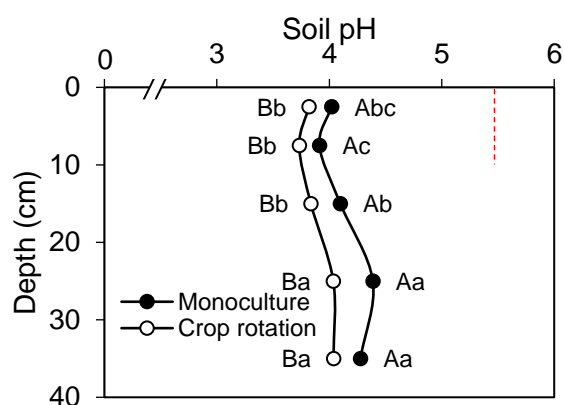


Figure 3. Soil pH in depth affected by cropping systems after 14-years in a long-term integrated crop-livestock system experiment from southern Brazil. Red dotted line represents the reference pH value (5.5) for the diagnostic layer (0–10 cm) for grain cultivation (Group 2), according to CQFS-RS/SC (2016). Values for soil depth are the overall mean of two grazing intensities, and two stocking methods (n = 16). Means followed by same capital letter in the row, comparing layers for each crop systems, and means followed by same lowercase letter in the column, comparing crop systems within each soil layer, are not significantly different at P<0.05 by Tukey test.

The effective CEC (estimated by the sum of Al, Ca and Mg extracted by KCl 1 mol L⁻¹, and the K extracted by Mehlich-1) was higher on the surface (layer

0-5 cm), and it was affected by both cropping system (**Figure 4A**) and grazing intensities (**Figure 4B**). Crop rotation and low grazing intensity showed higher CEC, being 15% and 11% higher than soybean monoculture and moderate intensity, respectively. It is due to the greater amount of crop residues on the surface. In the crop rotation system, there was an addition of approximately 3.0 Mg ha⁻¹ year⁻¹ of residue, while in the monoculture it was only 1.2 Mg ha⁻¹ year⁻¹ of residue, mainly due to the higher biomass input by maize (Campos, 2015). The amount of residues was 40% higher in the low intensity of grazing treatments (3.2 Mg ha⁻¹ year⁻¹ of residue) compared to the moderate intensity (2.3 Mg ha⁻¹ year⁻¹) (Moojen, 2017). The higher amount of residues on the surface has a great importance in the increase carbon content, and consequently, the increase of CEC, especially in soils with low clay activity (Ciotta et al., 2003) were negative charges are mainly derived from functional groups of organic matter. This confirms the importance of a high input of crop residues in a subtropical environment (Bayer et al., 2006), promoting an increase in organic matter contents both in surface and subsurface (Veloso et al., 2018).

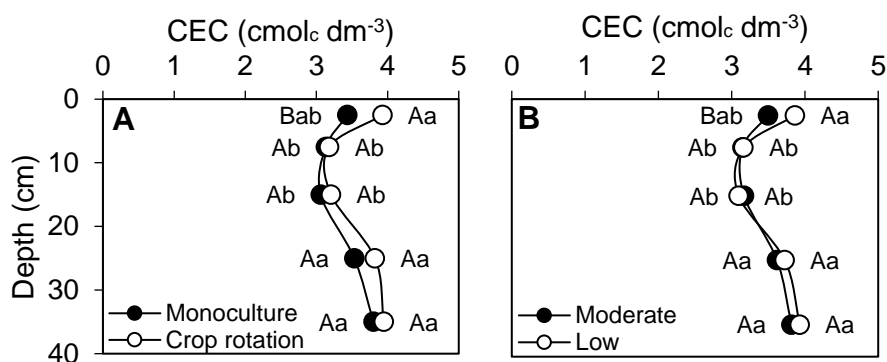


Figure 4. Effective soil cation exchange capacity (CEC) in depth affected by cropping systems (**A**) and grazing intensities (**B**) after 14-years in a long-term integrated crop-livestock system experiment from southern Brazil. Values for soil depth are the overall mean of two grazing intensities, and two stocking methods ($n = 16$) (A); values for soil depth are the overall mean of two crop systems and two stocking methods ($n = 16$) (B). Means followed by same capital letter in the row, comparing layers for each crop systems (A) and grazing intensities (B), and means followed by same lowercase letter in the column, comparing crop system (A) and grazing intensities (B) within each layer, are not significantly different at $P < 0.05$ by Tukey test.

Soil available P was the nutrient with the highest concentration gradient in the soil profile, with higher levels in the 0-10 cm layer, decreasing in depth (**Figure 5A**) corroborating with other studies under long-term no-tillage systems in Southern Brazil (Tiecher et al., 2017; Rheinheimer et al., 2008). The high concentration of P at the soil surface and the marked gradient are attributed to: (i) the low mobility of the element in the soil; (ii) the addition of phosphate fertilizers in the surface and; (iii) the absence of soil disturbance.

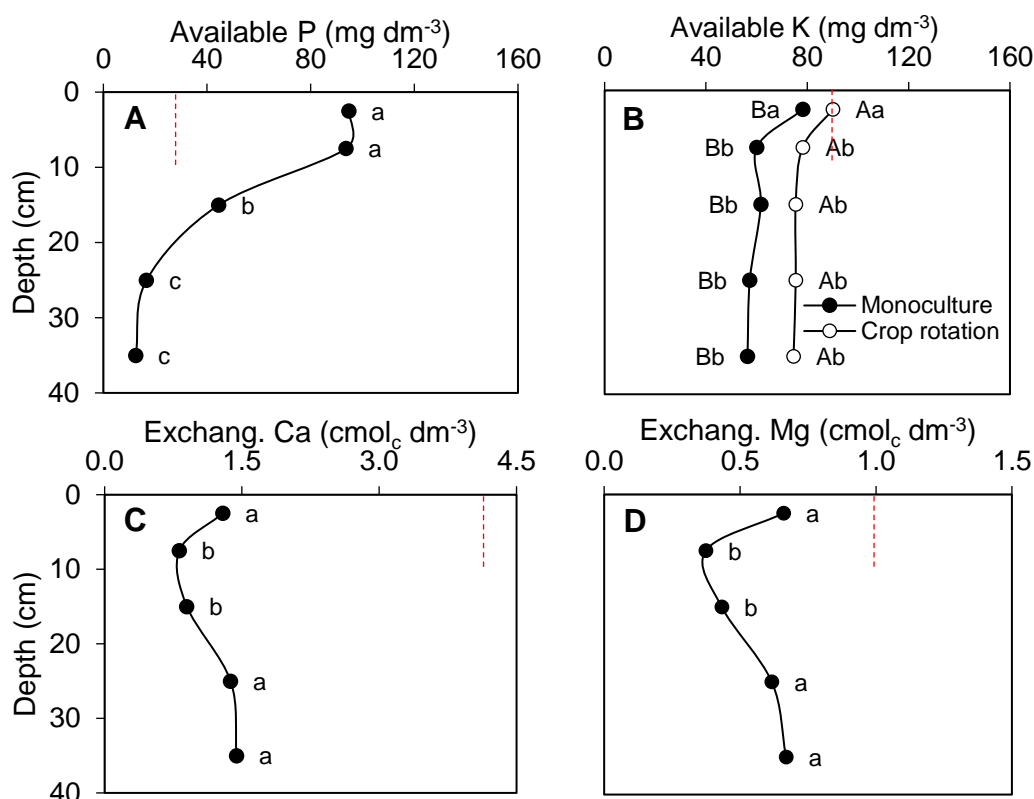


Figure 5. Available phosphorus (**A**) and potassium (**B**), exchangeable calcium (**C**) and magnesium (**D**) in depth after 14-years in a long-term integrated crop-livestock system from southern Brazil. Red dotted line represents the critical contents for the layer (0–10 cm) for phosphorus (30 mg dm⁻³), potassium (90 mg dm⁻³), considering a soil of texture class 4 and CTC_{pH7} between 7.6 and 15.0, calcium (4 cmol_c dm⁻³) and magnesium (1.0 cmol_c dm⁻³), according to CQFS-RS/SC (2016). Values for soil depth are the overall mean of two crop systems, two grazing intensities, and two stocking methods (n = 32) (A, C e D); Values for soil depth are the overall mean of two grazing intensities, and two stocking methods (n = 16) (B). Letters differentiate the nutritional content in depths (A C e D); means followed by same capital letter in the row, comparing layers for each crop systems, and means followed by same lowercase letter in the column, comparing crop systems within each layer (B), are not significantly different at $P < 0.05$ by Tukey test.

The soil exchangeable Ca and Mg contents were also below those considered adequate according to CQFS-RS/SC (2016) (**Figures 5C and 5D**). In addition, there was a lower concentration of these nutrients in the 5-20 cm layer. This zone of depletion can be related to the greater area of action of the roots (Dong et al., 2017). Also, this depletion zone can be justified by three other factors: (i) decrease in organic matter content with depth, (ii) increase in clay content with depth, and (iii) nutrient return by residue decomposition. The main components that generate electric charges (CEC) capable of retaining exchangeable cations in the soil are organic matter and clay minerals (Sparks, 2003). Thus, in the most superficial layer, the CEC is originated mainly in the organic matter, whereas in deeper soil layers, it originates mainly in the clay minerals. However, in the intermediate layer of the soil (5-20 cm), there is a combination of low clay and organic matter content and, therefore, the CEC is smaller than the rest of the soil profile. Consequently, the amount of exchangeable cations (Ca and Mg) adsorbed to the soil is lower in this layer (**Figure 5A and 5B**). Furthermore, the most superficial layer of the soil (0-5 cm) relies on all nutrients return through the process of nutrient cycling, via decomposition of organic residues, plants and animal waste.

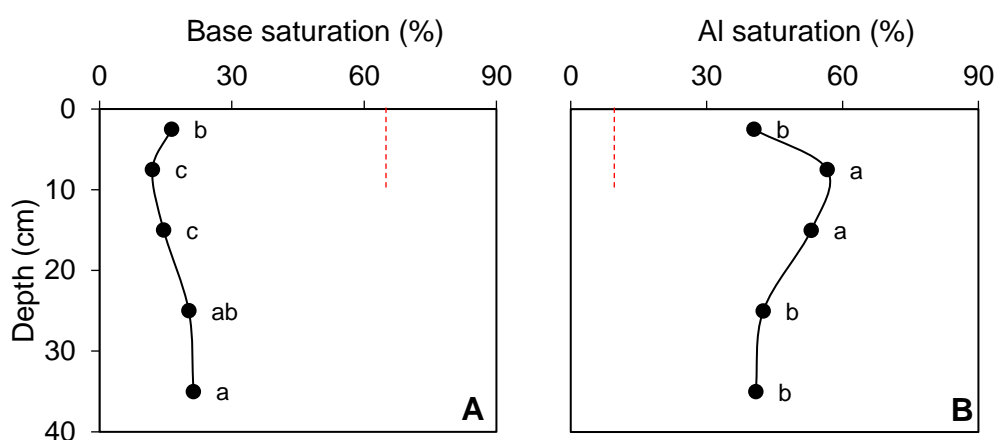


Figure 6. Base saturation (**A**) and aluminum saturation (**B**) in depth after 14-years in a long-term integrated crop-livestock system experiment from southern Brazil. Red dotted line represents the reference value for base saturation ($\geq 65\%$) and aluminum saturation ($\leq 10\%$), according to CQFS-RS/SC (2016). Values for soil depth are the overall mean of two crop systems, two grazing intensities, and two stocking methods ($n = 32$). Letters differentiate the saturation in soil layer, are not significantly different at $P < 0.05$ by Tukey test.

The base saturation and Al saturation presented values of 16 and 47%, respectively, in the 0-10 cm layer (**Figures 6A and 6B**). These results, according to CQFS-RS/SC (2016), are also considered unsuitable for most grain crops, such as soybean and corn. Low base saturation and high Al saturation are causally related to each other (**Figure 7**). The reduction of the levels of basic cations (K, Ca, and Mg) in the soil and the decrease of pH over time (**Figure 2A**), make Al more active, occupying a greater amount of exchange sites in the soil (Cai et al. 2015).

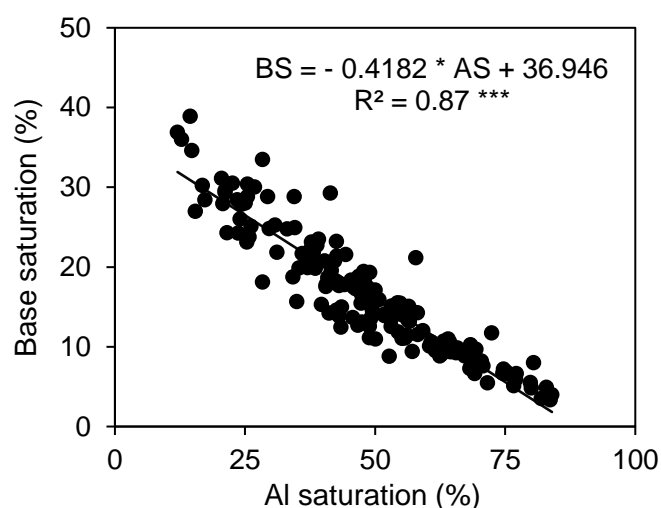


Figure 7. Relationship between base saturation (BS) and aluminum saturation (AS) in the soil after 14-years in a long-term integrated crop-livestock system experiment from southern Brazil. *** Significant at $P < 0.001$.

3.3. Soil nutrient budget

The significance of the effects of stocking methods, grazing intensities and crop rotation systems on the nutrient budget is presented in **Table 4**. The effective budget of K after 14 years was more negative in soybean monoculture because it exports more of this nutrient than maize (output) (**Table 5**). Differently from K, although P grain export was higher in crop rotation (about 24% higher than monoculture - **Table 5**), this nutrient was not differentiated in the effective budget and in the soil, due to the higher production and consequent export of P by maize.

Table 4. Significance of the effects of experimental factors and their interactions on nutrient budget over 14-years in a long-term integrated crop-livestock system experiment in southern Brazil for the 0-10 cm soil layer, as resulting from analysis of variance (ANOVA).

Variable	Nutrient	S ^a	G ^b	S x G	C ^c	S x C	G x C	S x G x C
Outputs by soybean/maize grain	P	***	***	ns	**	ns	ns	ns
	K	***	***	**	*	ns	ns	ns
	Ca	***	***	**	***	ns	ns	ns
	Mg	***	***	ns	***	ns	ns	ns
Output by sheep meat	P	ns	**	ns	-	-	-	-
	K	ns	**	ns	-	-	-	-
	Ca	ns	**	ns	-	-	-	-
	Mg	ns	***	ns	-	-	-	-
Final content of available/exchangeable in the soil in 2017	P	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	K	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
	Ca	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Mg	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Soil budget of available/exchangeable in the 0-10 cm soil layer from 2003- 2017	P	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	K	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Ca	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
	Mg	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Effective budget of nutrients from 2003-2017	P	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	K	***	***	**	ns	ns	ns	ns
	Ca	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
	Mg	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns

^a Stocking methods; ^b Grazing intensity; ^c Crop systems; ^d Content available in kg ha⁻¹ for the soil layer 0–10 cm. ** Significant at $P < 0.05$; * Significant at $P < 0.01$; *** Significant at $P < 0.001$; ns = not significant.

Although the exports of Ca and Mg via grains were higher in the soybean-maize rotation system, with 40.9 and 32.3 kg ha⁻¹, respectively, it presented a less negative effective budget in relation to soybean monoculture system (**Table 5**). This can be attributed to the deeper action of maize roots, which have a potential to reach more than 2 m depth (Oosterom et al., 2016), being able to uptake these nutrients from deeper soil layers and make them available on the soil surface.

The effective budget of K for the 0-10 cm layer is negative (average of - 417 kg ha⁻¹) because probably K is being accumulated in non-exchangeable forms adsorbed on the 2:1 clayey interlayer (Ernani et al., 2007), and part may be migrating to layers below 10 cm depth. Since the effective budget of P was negative (average of -149 kg ha⁻¹), probably the same is being accumulated in forms less available in the soil, such as those adsorbed onto Fe and Al oxides (Gatiboni et al., 2007).

The budget of P and Mg was affected by both stocking methods and grazing intensities (**Table 6**). In the low grazing intensity, there was greater export of nutrients via grains. Larger productive outputs such as this are desirable and demonstrate the importance of good management of grazing intensity in maintaining crop productivity without directly affecting the budget of this nutrient through an efficient cycling without reducing their availability over time (Souza et al., 2008; Deiss et al., 2016).

Likewise, in the rotational stocking method there was a higher export of P and Mg via grains, due to the higher crop yields (**Table 6**). Grain outputs and the effective K and Ca budget in the soil were influenced by the interaction between different stocking methods and grazing intensities (**Table 7**). The low grazing intensity showed an export of K and Ca approximately 20% higher only in the continuous stocking method, with no differences between intensities in the rotational stocking method. The rotational stocking method showed higher exports for both grazing intensities, with mean increases of 47 kg ha⁻¹ over K and 4.5 kg ha⁻¹ over Ca (**Table 7**). The effective budget of K was less negative in the rotational stocking method, following the same trend of K output via grains. This demonstrates the importance of rotational grazing in an ICLS, mainly due to the more homogeneous distribution of the animal waste in the soil. In the method of continuous grazing, the animals have a greater selection option, and they are often concentrated near water fountains and feeders, depositing feces and urine in an inconsistent and uneven manner, influencing the distribution of nutrients in the soil (McNaughton, 1982, Augustine & Frank, 2001, Olofsson, 2008). On the other hand, in rotational grazing, in which the animal is forced to pass through the whole

area, the deposition of the waste and urine occurs more uniformly, improving the better spatial distribution of the nutrients.

In general, the nutrients budget was more affected by the amount of nutrient exported by cash crops than with sheep meat exports. In general, about 95% of the P and K and 99% of the Ca and Mg were exported by the summer crop grains. This demonstrates that the "cropping phase" in an ICLS controls the outputs of nutrients from the agricultural system, and therefore can be considered as controlling components of soil nutrient budget (**Figure 8**).

Table 5. P, K, Ca, and Mg budget for the 0-10 cm soil layer comparing the effect of crop systems after 14-years in a long-term integrated crop-livestock system experiment in southern Brazil.

Crop systems	Initial–2003 (soil)	Accumulated from 2003 to 2017			Final–2017 (soil)	Effective budget ^a	Soil budget ^b
		Input	Output (grain crop)	Output (sheep meat)			
P (kg ha⁻¹)^c							
Crop rotation	17.3	401.5	167.6 a	10.0	98.1 a	-143.1 a	80.8 a
Monoculture	17.3	401.5	135.0 b	10.0	119.1 a	-154.7 a	101.8 a
K (kg ha⁻¹)^c							
Crop rotation	167.0	713.9	337.6 b	17.7	103.1 a	-422.5 a	-63.9 a
Monoculture	167.0	713.9	365.9 a	17.7	85.5 b	-411.8 a	-81.5 b
Ca (kg ha⁻¹)^d							
Crop rotation	520.4	-	89.5 a	0.4	234.8 a	-172.5 a	-285.6 a
Monoculture	520.4	-	48.6 b	0.4	251.8 a	-220.1 b	-268.6 a
Mg (kg ha⁻¹)^d							
Crop rotation	180.4	-	83.1 a	1.4	72.3 a	-17.8 a	-108.1 a
Monoculture	180.4	-	50.8 b	1.4	76.7 a	-51.5 b	-103.7 a

^a $EB = (FS - IS) - (IF - OGM)$ (EB = effective budget; FS = Final soil content; IF = inputs via fertilizer; IS = initial soil content; OGM = outputs via grain and meat). ^b $SB = FS - IS$ (SB = soil budget). ^c Calculated from the initial content in mg kg⁻¹. ^d Calculated from the initial content in cmol_c kg⁻¹. Means followed by same letter in the column, comparing crop systems, are not significantly different at $P < 0.05$ by Tukey test.

Table 6. P and Mg budget for the 0-10 cm soil layer comparing stocking method and grazing intensity after 14-years in a long-term integrated crop-livestock system experiment in southern Brazil.

Grazing management	Initial–2003 (soil)	Accumulated from 2003 to 2017			Final–2017 (soil)	Effective budget ^a	Soil budget ^b
		Input	Output (grain crop)	Output (sheep meat)			
Stocking method	P (kg ha⁻¹)^c						
Continuous	17.3	401.5	143.1 b	10.4 a	110.2 a	-170.3 a	92.9 a
Rotational	17.3	401.5	159.5 a	9.6 a	106.9 a	-157.3 a	89.6 a
	Mg (kg ha⁻¹)^d						
Continuous	180.4	-	64.4 b	1.5 a	70.4 a	-44.1 a	-110.0 a
Rotational	180.4	-	69.7 a	1.4 a	79.7 a	-30.1 a	-100.7 a
Grazing intensity	P (kg ha⁻¹)^c						
Moderate	17.3	401.5	142.1 b	10.9 a	109.3 a	-167.0 a	91.7 a
Low	17.3	401.5	160.5 a	9.0 b	108.1 a	-160.6 a	90.8 a
	Mg (kg ha⁻¹)^d						
Moderate	180.4	-	62.8 b	1.6 a	71.7 a	-44.2 a	-108.7 a
Low	180.4	-	71.2 a	1.3 b	78.4 a	-30.0 a	-102.0 a

^a $EB = (FS - IS) - (IF - OGM)$ (EB = effective budget; FS = Final soil content; IF = inputs via fertilizer; IS = initial soil content; OGM = outputs via grain and meat). ^b $SB = FS - IS$ (SB = soil budget). ^c Calculated from the initial content in mg kg⁻¹. ^d Calculated from the initial content in cmol_c kg⁻¹. Means followed by same letter in the column, comparing stoking method and grazing intensity, are not significantly different at $P < 0.05$ by Tukey test.

Table 7. K and Ca budget for the 0-10 cm soil layer comparing the interaction between stocking method and grazing intensity after 14-years in a long-term integrated crop-livestock system experiment in southern Brazil.

Stocking method	Initial-2003 (soil)	Accumulated from 2003 to 2017				Final-2017 (soil)	Effective budget ^a		Soil budget ^b
		Input	Output (grain crop)		Output (sheep meat)		Moderate	Low	
			Moderate	Low					
K (kg ha⁻¹)^c									
Continuous	167.0	713.9	299.9 Bb	356.5 Ab	18.4 a	92.1 a	-468.7 Bb	-410.2 Ab	-74.8 a
Rotational	167.0	713.9	365.3 Aa	385.2 Aa	17.1 a	94.0 a	-399.1 Aa	-389.9 Aa	-72.9 a
Ca (kg ha⁻¹)^d									
Continuous	520.4	-	58.9 Bb	69.6 Ab	0.38 a	235.8 a	-222.2 Aa	-217.8 Aa	-284.6 a
Rotational	520.4	-	64.7 Aa	72.8 Aa	0.36 a	258.6 a	-181.5 Aa	-203.9 Aa	-261.9 a

^a $EB = (FS - IS) - (IF - OGM)$ (EB = effective budget; FS = Final soil content; IF = inputs via fertilizer; IS = initial soil content; OGM = outputs via grain and meat). ^b $SB = FS - IS$ (SB = soil budget). ^c Calculated from the initial content in mg kg⁻¹. ^d Calculated from the initial content in cmol_c kg⁻¹. Means followed by same letter in the column, comparing stoking method within each grazing intensity, and means followed by same capital letter in the row, comparing grazing intensity within each stocking method, are not significantly different at $P < 0.05$ by Tukey test.

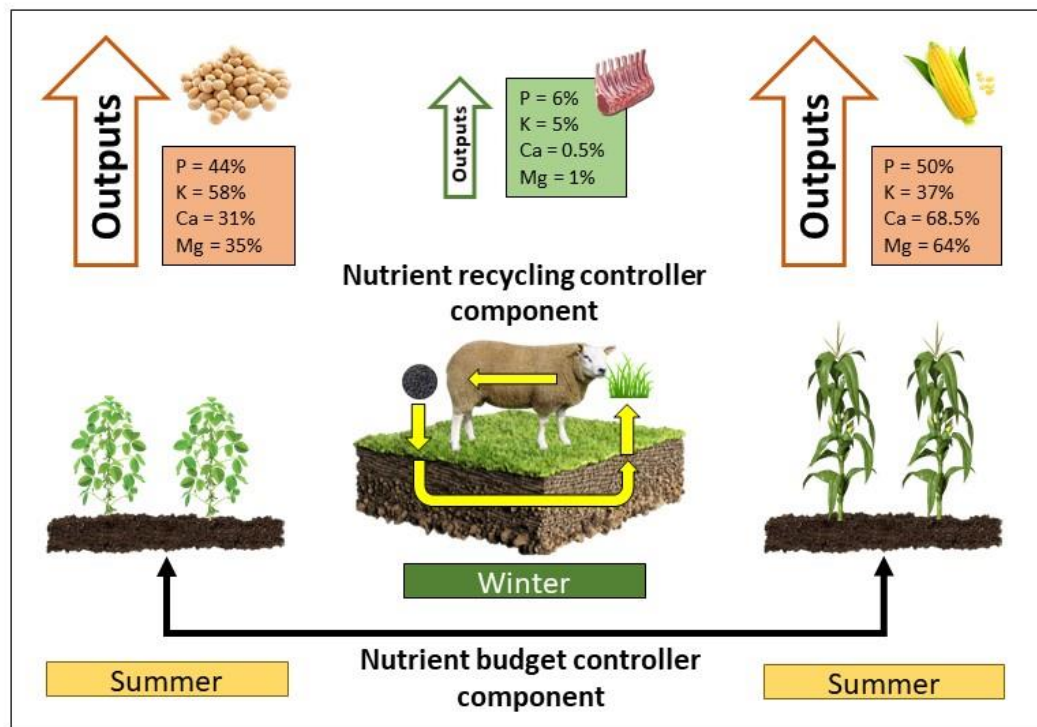


Figure 8. Schematic representation an integrated crop-livestock system with crop rotation (soybean/maize) and sheep grazing in the winter period and their respective contributions in the average export of nutrients for 14-years.

On the other hand, the contribution of animal to the nutrient outputs is of minor importance in the system, showing that most of the nutrients ingested in the grazing process return to the system. The "livestock phase" acts as an important (re) cycling component of the system, contributing to the greater absorption of nutrients, returning almost entirely these nutrients to the soil, and therefore act as a controlling component of the nutrients recycling in the system (**Figure 8**). Thus, while the choice of summer crop system directly affects the nutrient budget (inputs and outputs), the management of the animal component, especially considering the grazing intensity and the stocking method, defines its direct action on the magnitude of nutrient flux between the compartments of the system.

4. Conclusions

Regardless of the grazing method or intensity, the chemical properties related to soil fertility, except for the available phosphorus content, decreased over time for the different integrated crop-livestock systems evaluated. This decrease in soil fertility results from the non-replacement of basic cations (potassium, calcium, and magnesium), accompanied by a constant export of these nutrients by grain crops. This demonstrates that soil fertility monitoring practices are extremely essential in integrated crop-livestock systems to prevent nutritional imbalances in soil.

The maize-soybean rotation system in the summer period resulted in a higher cation exchange capacity and available potassium content up to 40 cm depth, as well as a higher soil acidity, because of the higher input of ammoniacal nitrogen fertilizers. Crop rotation promotes greater exportation of phosphorus, calcium, and magnesium in relation to monoculture. While monoculture promotes greater export of potassium, due to the greater amount exported in the soybean grains in relation to maize, the rotational stocking method presents a higher content of potassium and calcium in the soil, due to the better distribution of nutrients.

Integrated crop-livestock systems involving low grazing intensities and rotational stocking methods, combined with summer crop rotation, are more efficient in the use of nutrients, thus increasing yields (grain + meat) and making the effective nutrient budget less negative over time. Thus, the results obtained in the present study demonstrate that when integrated crop-livestock production systems are well planned, using appropriate crop rotations, stocking methods and intensities, they can be a viable alternative of sustainable intensification to increase food production.

CAPÍTULO IV – Efeito da rotação de culturas e do manejo da pastagem sobre a produtividade dos cultivos e os estoques de C e N no solo

1. Introdução

A matéria orgânica do solo (MOS) é considerada um dos principais indicadores de qualidade do solo, e o seu decréscimo está estreitamente relacionado a possíveis indícios de degradação do solo (Bümemann et al., 2018). Níveis adequados de MOS, em geral, conferem um solo mais fértil, mantendo altas produtividades dos cultivos ao longo do tempo e promovendo maior segurança alimentar (Ghosh et al., 2010; Lal, 2004). Em solos tropicais fortemente intemperizados uma das principais funções da MOS é gerar cargas, aumentando assim a capacidade de reter nutrientes catiônicos como Ca, Mg e K (Ciotta et al., 2003), e de disponibilizar outros nutrientes essenciais às plantas como P e N. Esse último é um dos nutrientes mais utilizados, absorvidos e mais exportado pelas culturas de grãos. Apesar da crescente utilização de fertilizantes minerais, estima-se que cerca de 25 a 50% do N utilizado pelas plantas é ainda advindo da MOS (De Neve, 2017).

A importância de se manter níveis adequados de MOS em ambientes tropicais e subtropicais faz com que sejam preconizadas práticas de manejo que promovam aumento nos estoques de carbono (C) no solo. A simples conversão de sistemas agrícolas de cultivo com preparo convencional (PC) em sistemas conservacionistas, como o plantio direto (PD), já contribui para minimizar perdas de C (Bayer et al., 2006), resultando em um balanço positivo de C (Das et al., 2018; Mbutia et al., 2015). O aumento da MOS em PD está relacionada aos mecanismos físicos de proteção da MOS e ao estado de agregação do solo (Six et al., 1999), e somente essa prática representa 24,3% das estratégias de

mitigação das emissões de CO₂ do plano de agricultura de baixo carbono (ABC) (Sá et al., 2017).

A adoção de sistemas mais diversificados, como os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), que alternam temporalmente a produção de grãos e pastagens para alimentação dos animais, podem ser ainda mais eficientes no sequestro de C (Sá et al., 2017) e, conseqüentemente, no acúmulo de C no solo. Isso se deve ao potencial das pastagens em acumular C, as quais contam com aproximadamente 20% de todo estoque de C do mundo (FAO, 2009). Assim, além de representar uma alternativa viável e sustentável de diversificação de renda ao produtor rural (Russelle et al., 2007; Allen et al., 2007; Carvalho et al., 2010), o uso de SIPA implica em diversos benefícios no sistema produtivo, como incrementos no teor de C, na disponibilidade de N (Loges et al., 2018; Conant et al., 2017; Cicek et al., 2013; Salton et al., 2011) e na diversidade microbiana, acarretando em maiores acúmulos de C quando comparado a sistemas puramente agrícolas (Viaud et al., 2018; Boeni et al., 2014).

As alterações no ambiente decorrentes da adoção de SIPA se devem a um processo contínuo em que a magnitude e a direção dependem principalmente do arranjo espaço-temporal do sistema produtivo (Anghinoni et al., 2013). Isso está relacionado tanto à diversidade de cultivos agrícolas (rotação de culturas), quanto ao manejo dos animais na pastagem (intensidade de pastejo) (Carvalho et al., 2010), principalmente porque ambos os fatores alteram a dinâmica de aporte de resíduos ao sistema.

O aporte de resíduos, que envolve não apenas a quantidade, mas também a qualidade, pode afetar o acúmulo de MOS. Resíduos contendo mais constituintes lábeis e baixa relação C/N, podem favorecer acúmulo de C por serem mais eficientemente utilizados por microrganismos, favorecendo o acúmulo de C via interação organomineral (Cotrufo et al., 2013), tanto em superfície quanto em profundidade (Veloso et al., 2018). Isso indica que a diversidade de cultivos proporcionada pelos SIPA pode potencializar o acúmulo de C, tanto por serem conduzidos em PD e favorecerem os mecanismos de agregação do solo (Souza et al., 2010), quanto pela alta quantidade, qualidade e diversidade de resíduos aportados favorecendo o acúmulo de C via associação organomineral (Santos et al., 2011).

A diversificação do sistema produtivo com uso de rotação de culturas é vista como alternativa para aumentar os teores de C no solo (Poeplau & Don, 2015; Havlin et al., 1990). No ambiente de produção subtropical brasileiro, a soja é a cultura mais cultivada em área, com cerca de 61,5 milhões de hectares (CONAB, 2018). Como alternativa ao seu monocultivo tem-se o cultivo do milho em rotação, em função do seu alto potencial em aportar resíduos ao solo (Chen et al., 2018), sendo que a adoção da rotação de culturas pode incrementar aproximadamente 200 kg C ha⁻¹ em relação ao monocultivo (West & Post, 2002).

Entretanto, a maioria dos estudos avaliam o impacto da rotação de culturas em sistemas puramente agrícolas, somente verificando o efeito isolado do cultivo. Em contraponto, o ciclo da pastagem é renegado a um segundo plano, sendo que esta é a fase regeneradora dos estoques de C no sistema (FAO, 2010). Além disso, os componentes lavoura e pecuária estão interligados e estabelecem relações sinérgicas entre si, e por isso é extremamente importante a avaliação do arranjo espaço-temporal em todo sistema.

Apesar de promissores, os trabalhos que avaliam a dinâmica do C e N sob diferentes arranjos de SIPA, tanto envolvendo a fase lavoura como a pecuária, ainda são escassos, especialmente em ambientes subtropicais. Embora a magnitude do acúmulo de MOS em SIPA dependa de diversos fatores, como os tipos de culturas e as condições edafoclimáticas, o tempo desde a adoção dos SIPA é um fator determinante. Alguns estudos mostram alterações nos teores de C e N do solo somente após dez anos da alteração do sistema (Assmann et al., 2014; Silva et al., 2014; Franzluebbbers & Stuedemann, 2010), e daí surge a importância de estudos em experimentos de longo prazo para avaliação dinâmica do C e N nesse tipo de ambiente.

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar o impacto da intensidade e frequência do animal em pastejo no período hibernar e da rotação de culturas no período estival (i) na produção de biomassa e produtividade de soja e milho e (ii) na matéria orgânica do solo, pela avaliação dos teores e estoques de C e N no solo, após 14 anos da adoção de um sob sistema integrado de produção de grãos e ovinos de corte em um Plintossolo do subtropical brasileiro.

2. Material e métodos

2.1. Histórico e condução experimental

Todo o histórico de condução experimental e descrição dos tratamentos utilizados neste estudo está descrito nos itens 2.1 e 2.2 do capítulo III.

2.2. Produtividade dos cultivos

Para a produtividade da soja foram utilizadas as safras de 2003/2004, 2004/2005, 2006/2007, 2010/2011 e 2014/2015. Foram escolhidas as safras de soja apenas nos anos que havia soja na subparcela de rotação, para poder obter o efeito da rotação com o milho sobre a produtividade da mesma. Já para a produtividade do milho, as safras utilizadas foram 2005/2006, 2007/2008, 2009/2010, 2011/2012, 2013/2014 e 2015/2016. A colheita foi realizada de forma manual quando a soja atingiu a maturação plena, estágio reprodutivo R8, e o milho em R6, sendo amostrados cinco pontos aleatórios em cada parcela, cada ponto com dois metros lineares, totalizando 4,5 m². Após colhidas, as amostras foram levadas para o Departamento de Solos da UFRGS, onde foram trilhadas, feita a determinação do grau de umidade dos grãos e corrigidas para 13%.

2.3. Determinação da produção total e residual do azevém

Para estimativa da produção total de forragem (PTF, Mg MS ha⁻¹) foram utilizados os anos de 2004, 2005, 2006, 2007, 2010, 2011, 2012, 2015 e 2016. A qual foi calculada a partir da soma da massa de forragem acumulada na data de início do pastejo, mais a taxa de acúmulo de forragem (kg MS dia⁻¹) multiplicado pelo número de dias correspondentes a cada ciclo de pastejo. Não foi possível observar o efeito de monocultivo e rotação na PTF, pois as determinações não foram feitas de forma isolada na subparcela no período hibernar.

Para a massa de forragem residual foram utilizados os anos de 2010, 2011, 2012, 2015 e 2016. A massa de forragem residual (MFR, Mg MS ha⁻¹) foi

estimada coletando-se seis amostras de forragem por parcela. As coletas foram feitas aleatoriamente com auxílio de um quadro metálico com área conhecida de 0,25 m² (0,5 × 0,5 m), com o corte da forragem acima do solo. Logo as amostras foram guardadas em sacos de papel e levadas ao Departamento de Zootecnia da UFRGS. As mesmas foram secas em estufa de ar forçado a 55 °C, durante 72 horas. Após a secagem, o material foi pesado em balança de precisão e calculada a massa de forragem em Mg ha⁻¹.

2.4. Avaliação dos teores e estoques de C e N no solo

Para determinação dos teores de C e N no solo foram coletadas amostras de solo até a profundidade de 40 cm, estratificadas em quatro camadas (0–5, 5–10, 10–20 e 20–30 cm), totalizando 128 amostras. As amostras foram secas em estufa de circulação de ar forçado, a 50° C, sendo posteriormente destorroadas, moídas até ≤2,0 mm, sendo uma subamostra de 2,0 g triturada a ≤250 µm em um grau de ágata para determinar o teor de C e N orgânico total do solo por combustão seca em analisador elementar FlashEA® 1112.

Os estoques de C e N do solo até a profundidade de 30 cm foram calculados usando o método massa equivalente (Ellert e Bettany, 1995), que considera massas iguais de solo entre os tratamentos. Para determinação da densidade do solo foram realizadas coletas de solo com anéis metálicos com volume de 113 cm³ (4 × 6 cm) em cada tratamento. Para isso, foram amostradas três camadas de solo (0–10, 10–20 e 20–30 cm).

2.5. Análise estatística

A análise estatística foi realizada com o software SAS® 9.4, submetendo-se os resultados à análise de normalidade dos dados, pelo teste de Shapiro-Wilk e de homogeneidade de variâncias, pelo teste de Levene, ambos a um nível de significância de 5%. Após isso, quando significativos, aplicou-se o teste de análise de variância (teste F) e, quando alcançada significância estatística ($p < 0,05$), as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de comparações múltiplas de Tukey, também ao nível de significância de 5%.

Para a produtividade das culturas e de resíduos do azevém foi utilizado o modelo estatístico para medidas repetidas no tempo, testando as

matrizes de covariância, sendo escolhida a matriz que se obteve o menor valor AIC (Akaike's Information Criterion). Para a produtividade da cultura da soja, a que melhor se ajustou foi a Toep (Toeplitz), para o milho a Ar (Autoregressive) e para o resíduo do azevém a Arh (Heterogeneous Autoregressive). Os modelos estatísticos utilizados foram, para as seguintes variáveis:

(i) Produtividade da soja e massa de forragem residual:

$$y = \mu + B_i + e_i + M_j + e_{ij} + I_k + e_{ijk} + (MI)_{jk} + S_l + (MS)_{jl} + (IS)_{kl} + (MIS)_{jkl} + A_m + e_m + (MA)_{jm} + (IA)_{km} + (SA)_{lm} + (MSIA)_{jkm} + (MSA)_{jlm} + (ISA)_{klm} + (MISA)_{jklm} + e_{ijklm}$$

Onde: y = variável resposta, μ = média geral das observações, B_i = bloco ($i = 1, 2, 3, 4$), M_j = método de pastoreio ($j = 1, 2$), I_k = intensidade de pastejo ($k = 1, 2$), S_l = sistema de cultivo ($l = 1, 2$), A_m = ano ($j = 1, 2, 3, 4, 5$) e e_{ijklm} = efeito do erro aleatório.

(ii) Produtividade da cultura do milho e produção total de forragem:

$$y = \mu + B_i + e_i + M_j + e_{ij} + I_k + e_{ijk} + (MI)_{jk} + A_l + e_m + (MA)_{jl} + (GA)_{kl} + (MIA)_{jkl} + e_{ijkl}$$

Onde: y = variável resposta, μ = média geral das observações, B_i = bloco ($i = 1, 2, 3, 4$), M_j = método de pastoreio ($j = 1, 2$), I_k = intensidade de pastejo ($k = 1, 2$), A_l = ano ($l = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) e e_{ijkl} = efeito do erro aleatório.

(iii) Teor de C, N e relação C/N no solo:

$$y = \mu + B_i + e_i + M_j + I_k + (MI)_{jk} + e_{k(ij)} + S_l + (MS)_{jl} + (IS)_{kl} + e_{kj(il)} + (MIS)_{jkl} + C_m + e_{im} + (MC)_{jm} + (IC)_{km} + (SC)_{lm} + (MIC)_{jkm} + (MSC)_{jlm} + (ISC)_{klm} + (MISC)_{jklm} + e_{ijklm}$$

Onde: y = variável resposta, μ = média geral das observações, B_i = bloco ($i = 1, 2, 3, 4$), M_j = método de pastoreio ($j = 1, 2$), I_k = intensidade de pastejo ($k = 1, 2$), S_l = sistema de cultivo ($l = 1, 2$), C_m = camada ($j = 1, 2, 3, 4$) e e_{ijklm} = efeito do erro aleatório.

(iv) Estoque de C e N no solo:

$$y = \mu + B_i + e_i + M_j + I_k + (MI)_{jk} + e_{k(ij)} + S_l + (MS)_{jl} + (IS)_{kl} + e_{kj(il)} + (MIS)_{jkl} + e_{ijklm}$$

Onde: y = variável resposta, μ = média geral das observações, B_i = bloco ($i = 1, 2, 3, 4$), M_j = método de pastoreio ($j = 1, 2$), I_k = intensidade de pastejo ($k = 1, 2$), S_l = sistema de cultivo e e_{ijklm} = efeito do erro aleatório.

3. Resultados

3.1. Produtividade das culturas e da pastagem

A produtividade da cultura da soja foi afetada pelos métodos de pastoreio e intensidades de pastejo, nos anos 2004, 2010 e 2014 (**Tabela 8 e 9**). Nas demais safras, o rendimento da soja foi similar em todos os tratamentos ($P > 0,05$).

A produtividade da soja no método de pastoreio contínuo foi 109% e 14% maior na intensidade de pastejo baixa, em relação à intensidade moderada, nas safras de 2004 e 2014, respectivamente. Contudo, para o método de pastoreio rotativo, as intensidades de pastejo não afetaram a produtividade da cultura da soja ao longo dos anos. Dentro das intensidades de pastejo, a intensidade moderada, obteve produtividade superior no método de pastoreio rotativo em relação ao método de pastoreio contínuo, 163% em 2004, 34% em 2010, e 64% em 2014. Já a produtividade da cultura da soja dentro da intensidade baixa foi superior no método de pastoreio rotativo, 35% em 2004 e 34% no ano de 2014 (**Tabela 9**). No ano de 2014, quando foi observada a maior produtividade da área experimental, os tratamentos conduzidos sob método de pastoreio rotativo apresentaram produtividade de soja 48% superior ao método de pastoreio contínuo, independente da intensidade de pastejo adotada.

A produtividade da cultura do milho foi pouco afetada pelos tratamentos ao longo das safras analisadas. Embora tenha demonstrado uma tendência de maior produtividade com intensidades de pastejo baixa, esse resultado só se consolidou no ano de 2015, no qual também se obteve os maiores rendimentos de milho (**Figura 9**). No ano de 2015 a produtividade foi 40% superior na intensidade de pastejo baixa, ou seja, 2,4 Mg ha⁻¹ a mais em relação a intensidade moderada. As produtividades variaram bastante durante

os anos, obtendo-se produtividade de 1,9 Mg ha⁻¹ em 2007 e chegando a produções de 7,7 Mg ha⁻¹ no ano de 2015 (**Figura 9**).

Tabela 8. Significância dos efeitos experimentais e suas interações na produtividade da soja e milho e no resíduo de azevém ao longo dos anos, como resultado da análise de variância (ANOVA).

Variável	Soja	Milho	PTF ⁽⁵⁾	MFR ⁽⁶⁾
M ⁽¹⁾	**	ns	ns	ns
I ⁽²⁾	***	*	***	**
S ⁽³⁾	ns	-	-	*
A ⁽⁴⁾	***	***	**	***
M x I	**	ns	ns	ns
M x S	ns	-	-	ns
M x A	***	ns	ns	ns
I x S	ns	-	-	ns
I x A	ns	***	ns	ns
S x A	ns	-	-	ns
M x I x S	ns	-	-	ns
M x I x A	**	ns	ns	ns
M x S x A	ns	-	-	ns
I x S x A	ns	-	-	ns
M x I x S x A	ns	-	-	ns

⁽¹⁾ Método de pastoreio; ⁽²⁾ Intensidade de pastejo; ⁽³⁾ Sistema de cultivo; ⁽⁴⁾ Ano; ⁽⁵⁾ produção total de foragem; ⁽⁶⁾ massa de foragem residual. ** Significante a P <0,05; *** Significante a P <0,01; ns Significante a P <0,001; ns não significante.

Tabela 9. Produtividade da soja em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), submetidos a diferentes métodos de pastoreio (contínuo e rotativo) e intensidades de pastejo (moderado e baixa) em cinco anos (2003, 2004, 2006, 2010 e 2014) na região subtropical brasileira.

Ano	Contínuo		Rotativo	
	Moderada	Baixa	Moderada	Baixa
Produtividade (Mg ha ⁻¹)				
2003	1,25 Aab	1,49 Aab	1,32 Aac	1,15 Aac
2004	0,57 Bbc	1,19 Abc	1,50 Aac	1,61 Aab
2006	0,81 Aac	0,93 Aac	0,87 Aad	0,85 Aad
2010	1,35 Abb	1,60 Aab	1,81 Aab	1,78 Aab
2014	2,24 Bba	2,56 Aba	3,67 Aaa	3,43 Aaa

Letras maiúsculas comparam o método de pastoreio dentro de cada intensidade de pastejo nos diferentes anos. Letras minúsculas as intensidades de pastejo dentro de cada método de pastoreio nos diferentes anos. Letras em itálico comparam os anos dentro de cada método de lotação e intensidade de pastejo. Diferente pelo teste de Tukey P <0,05.

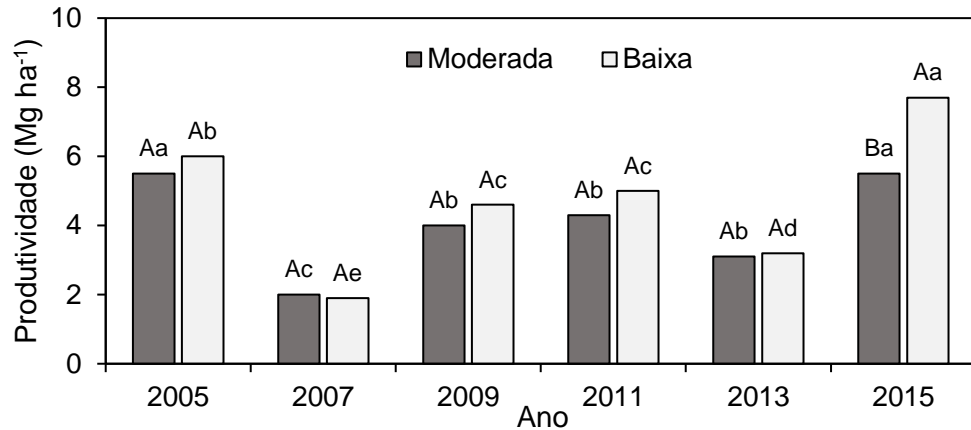


Figura 9. Produtividade do milho em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), submetido a diferentes intensidades de pastejo (moderada e baixa) em seis anos (2005, 2007, 2009, 2011, 2013 e 2015), na região subtropical brasileira. Letras maiúsculas comparam as intensidades de pastejo dentro de cada ano. Letras minúsculas comparam cada intensidade nos diferentes anos. Letras diferentes diferenciam-se pelo teste de Tukey $P < 0,05$.

A média da PTF foi alterada em função das intensidades de pastejo adotadas. Sendo que PTF ao longo dos anos foi em média de 11,1 Mg MS ha⁻¹ na intensidade de pastejo baixa, 32% superior a intensidade de pastejo moderada (8,4 Mg MS ha⁻¹) (**Figura 10**). Sendo que a PTF ao longo dos anos variou de 4,8 até 16,8 Mg MS ha⁻¹.

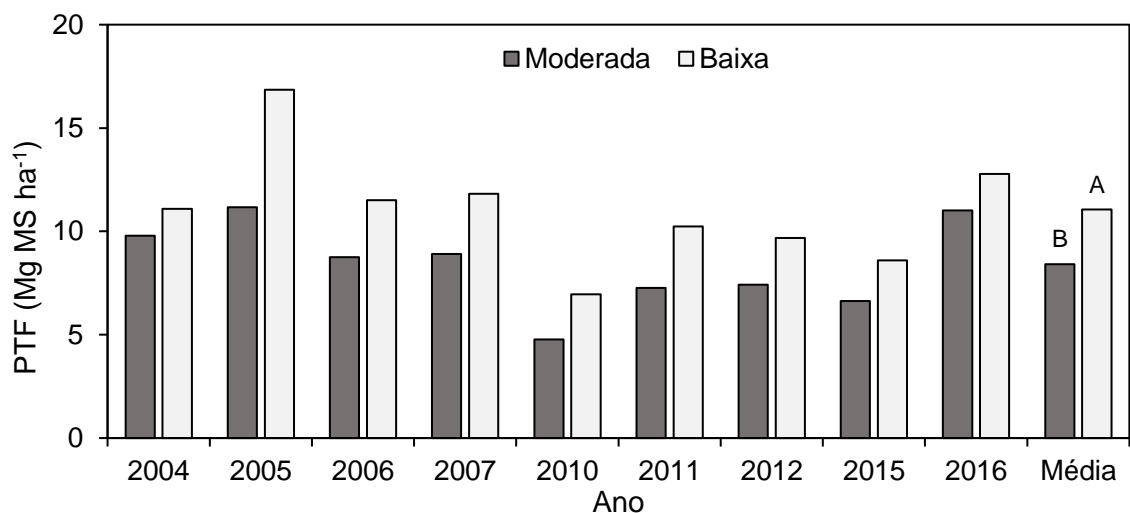


Figura 10. Produção total de forragem (PTF) (azevém anual) em sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) em função das intensidades de pastejo (moderada e baixa). Letras diferentes diferenciam a média dos anos avaliados em função das intensidades de pastejo, pelo teste de Tukey $P < 0,05$.

Na média dos cinco anos avaliados, a MFR foi afetada tanto pelas intensidades de pastejo, quanto pelos sistemas de cultivo (**Tabela 8**). A MFR apresentou uma produção de 3,1 Mg ha⁻¹ no monocultivo de soja, sendo 7% superior à produção obtida na rotação de culturas entre soja e milho (**Figura 11**). Em relação às intensidades de pastejo animal, a intensidade de pastejo baixa (3,4 Mg ha⁻¹) aportou anualmente 28% a mais de resíduo quando comparada à intensidade de pastejo moderada (2,7 Mg ha⁻¹) (**Figura 11**).

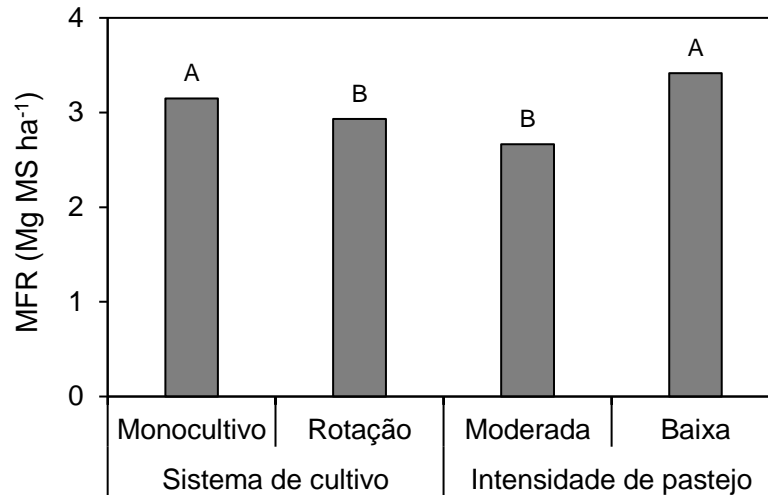


Figura 11. Massa de forragem residual (MFR) (azevém anual) em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), submetido a diferentes sistemas de cultivo (monocultivo – soja/soja e rotação – soja/milho) e intensidades de pastejo (moderada e baixa) por cinco anos (2010, 2011, 2012, 2013 e 2014) na região subtropical brasileira. Letras diferentes comparam os sistemas de cultivo (monocultivo e rotação) e as intensidades de pastejo (moderada e baixa) pelo teste de Tukey P <0,05

3.2. Carbono orgânico e nitrogênio total no solo

Os teores de C e N do solo foram alterados principalmente pelo sistema de cultivo adotado no período de verão e pela intensidade de pastejo adotada no inverno (**Tabela 10 e Figura 12**).

O monocultivo de soja obteve os maiores teores C, em torno de 26% superior ao sistema de rotação soja/milho (5,2 g kg⁻¹) (**Figura 12A**). Embora haja tendência desse efeito se manter em todo perfil do solo, as diferenças significativas se concentraram nas camadas mais superficiais (0-5 e 5-10 cm). Nas mesmas camadas, a intensidade de pastejo baixa apresentou teor de COS 24% superior à intensidade de pastejo moderada (4,6 g kg⁻¹) (**Figura 12B**). Os

teores de NTS foram 28% superior no monocultivo de soja na camada de 0–10 cm ($0,7 \text{ g kg}^{-1}$) (**Figura 12C**) e 20% superior na intensidade de pastejo baixa na camada de 0–5 cm ($0,4 \text{ g kg}^{-1}$), em relação à rotação soja/milho e à intensidade moderada, respectivamente (**Figura 12D**).

Tabela 10. Significância dos efeitos experimentais e suas interações no teor de carbono (C), nitrogênio (N), na relação carbono/nitrogênio (C/N) e estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo após 14 anos de adoção de um sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) na região subtropical brasileira, como resultado da análise de variância (ANOVA).

Variable	C	N	C/N	Estoque de C	Estoque de N
M ⁽¹⁾	ns	ns	ns	ns	ns
I ⁽²⁾	**	*	ns	**	ns
S ⁽³⁾	*	**	*	*	**
C ⁽⁴⁾	***	***	***	-	-
M × I	ns	ns	ns	ns	ns
M × S	ns	ns	ns	ns	ns
M × C	ns	ns	ns	-	-
I × S	ns	ns	ns	ns	ns
I × C	**	*	ns	-	-
S × C	**	*	**	-	-
M × I × S	ns	ns	ns	ns	ns
M × I × C	ns	ns	ns	-	-
M × S × C	ns	ns	ns	-	-
I × S × C	ns	ns	ns	-	-
M × I × S × C	ns	ns	ns	-	-

⁽¹⁾ Método de pastoreio; ⁽²⁾ Intensidade de pastejo; ⁽³⁾ Sistema de cultivo; ⁽⁴⁾ Camada. ** Significante a $P < 0,05$; * Significante a $P < 0,01$; *** Significante a $P < 0,001$; ns não significante.

A relação C/N do solo na camada subsuperficial (20-30 cm) foi 17% menor no monocultivo de soja em relação à rotação soja/milho (**Figura 12E**). Embora os maiores teores de C e N do solo tenham sido encontrados em superfície (camada de 0–5 e 5–10 cm) (**Figura 12A, 12B, 12C e 12D**) os maiores valores da relação C/N do solo foram encontrados em subsuperfície (**Figura 12E**).

Na **Tabela 11** são apresentados os valores médios anuais de aporte de C e N no solo nos diferentes sistemas de cultivo (monocultura e rotação), via resíduos de milho e soja no verão, e nas diferentes intensidades de pastejo (moderada e baixa), via resíduos de azevém no período do inverno, ao longo dos 14 anos de condução do experimento.

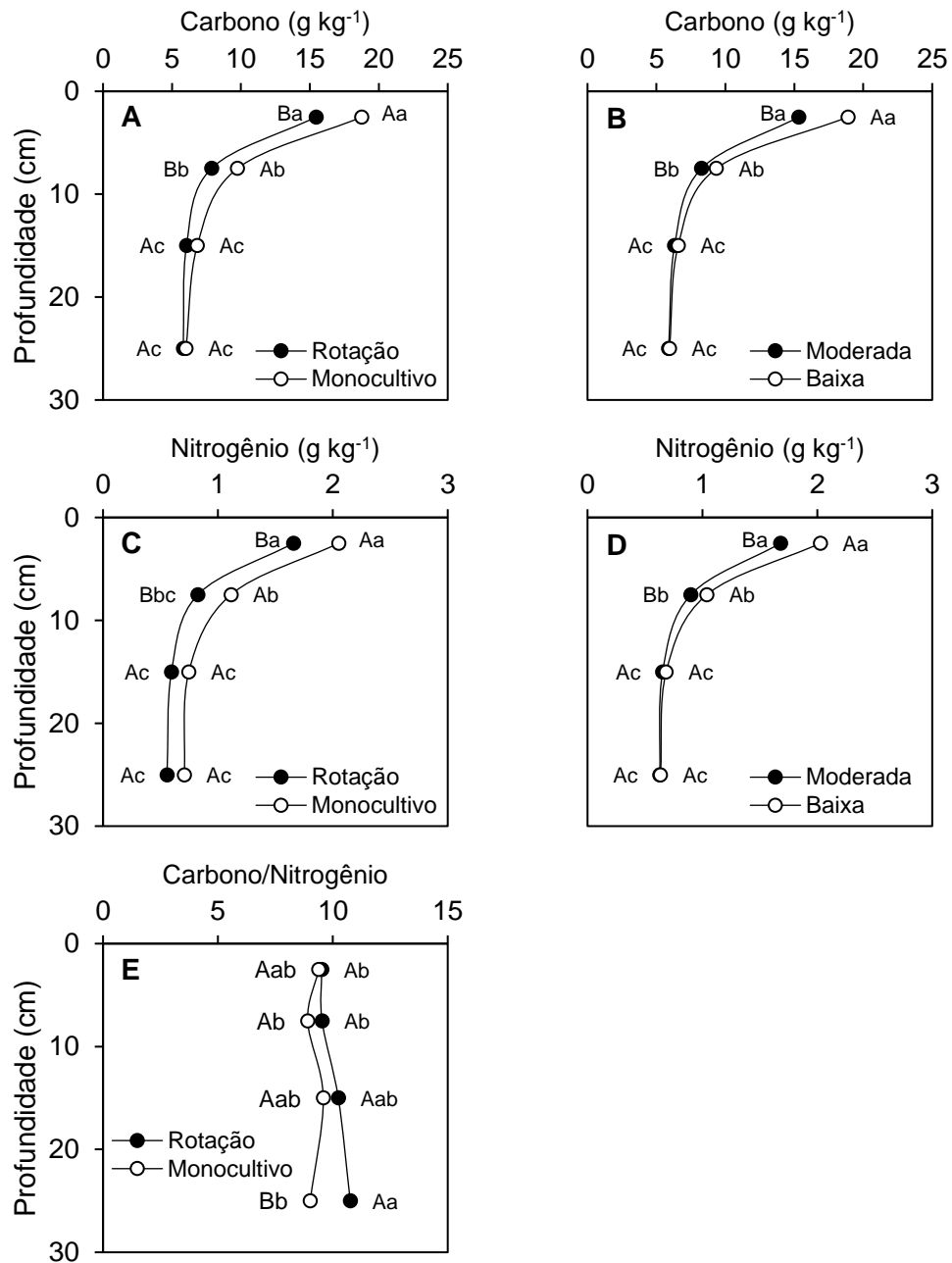


Figura 12. Efeito da interação entre sistema de cultivo (monocultivo – soja/soja e rotação – soja/milho) e profundidade para os teores de carbono (C) (A), nitrogênio (N) (C) e relação carbono/nitrogênio no solo (E). Efeito da intensidade de pastejo (moderada e baixa) e profundidade para os teores de C (B) e N (D). Quando identificada interação, letras maiúsculas comparam o tratamento dentro de cada profundidade. As letras minúsculas comparam entre profundidades cada tratamento, letras diferentes diferenciam-se pelo teste de Tukey $P < 0,05$.

Tabela 11. Média anual de aporte de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo via resíduos culturais em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), submetidos a diferentes sistemas de cultivo (monocultivo – soja/soja e rotação – soja/milho) e intensidades de pastejo (moderada e baixa) no subtropico brasileiro.

Entradas	Sistema de cultivo		Intensidade de pastejo	
	Monocultivo ^a	Rotação ^b	Moderada	Baixa
	Entradas no verão (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)			
Carbono	740,4	1280,6	954,7	1073,3
Nitrogênio	42,6	31,2	34,9	38,6
	Entradas no inverno (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)			
Carbono	1260,1	1168,3	1065,8	1363,7
Nitrogênio	19,4	18,0	16,40	20,98
Total C	2000,5	2448,9	2020,5	2437,1
Total N	61,9	49,2	51,3	59,6

^a Resíduo de soja e ^b resíduo de soja+milho no verão; resíduo de azevém no inverno em ambos os sistemas de cultivo.

O estoque de C no solo na camada de 0–30 cm foi superior no sistema com monocultivo de soja (5,9 Mg ha⁻¹), ou seja, 15% em relação a rotação de culturas e na intensidade de pastejo baixa (4,4 Mg ha⁻¹), 11% superior a intensidade moderada. Já o estoque de N no solo foi maior no monocultivo de soja (26%), 1,0 Mg ha⁻¹ a mais em relação a rotação soja/milho, porém a intensidade de pastejo não afetou o estoque de N no solo (**Tabela 12**).

Tabela 12. Estoque de carbono e nitrogênio no solo (0-30 cm) em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), submetidos a diferentes sistemas de cultivo (monocultivo – soja/soja e rotação – soja/milho) e intensidades de pastejo (moderado e baixo) em uma região subtropical brasileira.

Estoque (Mg ha ⁻¹)	Sistema de cultivo		Intensidade de pastejo	
	Monocultivo	Rotação	Moderada	Baixa
Carbono	44,6 a	38,7 b	39,5 b	43,9 a
Nitrogênio	4,9 a	3,9 b	4,2 a	4,6 a

Letras diferentes distinguem os estoques de carbono e nitrogênio no solo dentro de cada sistema de cultivo e intensidade de pastejo pelo teste de Tukey P <0,05.

Na **Figura 13** é apresentada a relação entre a quantidade de N aportado em cada sistema de cultivo, monocultura e rotação, via resíduos das culturais e os estoques de C após 14 anos da adoção dos diferentes sistemas. No monocultivo de soja, para cada kg de N aportado anualmente o estoque de C foi 0,58 Mg ha⁻¹ vs. 0,23 Mg ha⁻¹ na rotação de culturas.

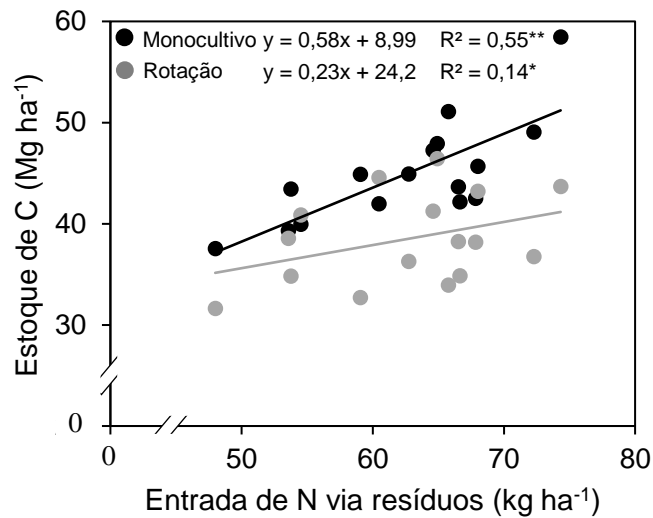


Figura 13. Relação entre entrada anual de N via resíduos culturais e estoques de C em diferentes sistemas de cultivo (monocultivo – soja/soja e rotação – soja/milho) após 14 anos da adoção de um sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) na região subtropical brasileira. ** Significativo a $P < 0,01$. * Significativo a $P < 0,05$.

4. Discussão

A dinâmica da MOS é facilmente alterada em ambientes tropicais e subtropicais, sobretudo pelas altas temperaturas e quantidades e distribuição de chuvas adequadas (Kirschbaum, 1995; Conant et al., 2011; Chen et al., 2016). Nesses ambientes, a adoção de práticas conservacionistas de manejo, como o plantio direto (Bayer et al., 2006) e a rotação de culturas (Ferreira et al., 2016), tem sido preconizada para obtenção de incrementos na MOS. Dentre as opções de plantas disponíveis para utilização em rotações de culturas, o milho representa uma importante alternativa devido à grande quantidade de resíduos aportados (Alvarez et al., 2014; Mazzilli et al., 2015; Chen et al., 2018). No entanto, após quatorze anos da adoção de SIPA sob diferentes sistemas de cultivos no verão, os teores C e N no solo foram superiores no monocultivo de soja, quando comparado à rotação com o milho (**Figura 12A**).

Embora o resíduo do milho não seja de alta qualidade, em função de sua alta relação C/N, o seu principal benefício no sistema produtivo decorre dos altos aportes de resíduo, os quais podem chegar a $10,8 \text{ Mg ha}^{-1}$, cerca de $4,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C, o que contribui para o aumento de C no solo (Alvarez et al., 2014; Mazzilli et al., 2015). No presente estudo, em decorrência principalmente dos

históricos de estiagens, o aporte médio de C ao longo dos anos foi de $2,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ na rotação de culturas (**Tabela 11**), bem abaixo do esperado, devido ao alto potencial de aporte pelo milho.

Um fator que tem ganhado cada vez mais importância nos incrementos de C no solo é a qualidade do resíduo aportado. A eficiência do uso do C tende a aumentar quanto menor for a relação C/N do substrato (Manzoni et al., 2008). Ou seja, quanto mais lábil for o resíduo, mais eficiente é o uso do substrato pelos microorganismos (Cotrufo et al., 2013), e mais eficiente é sua conversão em C orgânico do solo. Isso porque resíduos com alta relação C/N elevam as taxas de respiração microbiana (Michel & Matzner, 2003; Spohn, 2015), aumentando as perdas por CO_2 atmosférico, desfavorecendo o acúmulo de CO no solo. Comparando-se o aporte de um resíduo de milho, com uma relação C/N = 78 e de soja com relação C/N = 17 (Mazzilli et al., 2015), o resíduo de soja apresenta maior eficiência no acúmulo de C no solo. Em decorrência dessa eficiência, o aporte de resíduo de milho em um sistema produtivo deve ser o dobro quando comparado ao da leguminosa (Veloso et al., 2018). Assim, considerando-se os aportes de C da rotação ($2,4 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), é pouco superior ao aporte pela soja ($2,0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), e por isso esse sistema passa a não ser eficiente em acumular C no solo.

Além dos teores, os estoques de C e N no solo aumentaram no sistema de monocultivo de soja em relação a rotação soja-milho (0–30 cm) (**Tabela 12**). Alvarez et al. (2014) observou um maior estoque de C no sistema de rotação soja-milho em relação ao monocultivo de soja. Entretanto, o estoque de N no solo não teve diferenças em função dos sistemas de cultivo, diferente do presente estudo, onde o estoque de N também foi superior no monocultivo de soja. Isso demonstra que a soja, apesar de aportar menos resíduos ao solo, é mais eficiente em acumular N ao sistema, como também observado por Russelle & Birr (2004). Além disso, a quantidade de N ciclado via resíduos teve relação linear com o estoque de C no solo, sendo que no monocultivo de soja, para cada kg de N ciclado via resíduos anualmente determinou um incremento de $0,58 \text{ Mg ha}^{-1}$, versus $0,23 \text{ Mg ha}^{-1}$ na rotação (**Figura 13**) após 14 anos de condução. Isso comprova que resíduos com menor relação C/N, ou seja, que aportam mais N ao sistema (**Tabela 11**), aumentam a eficiência do uso C, como observado por

Manzoni et al. (2008), demonstrando que aportar maior quantidade de N no sistema pode ser tão interessante quanto aportar grande quantidade de C.

Devido à limitação hídrica o milho não conseguiu aportar uma grande quantidade de resíduos ao solo, apresentando produtividade de grãos muito baixas na maioria dos anos (**Figura 9**), quase sempre abaixo da média nacional (CONAB, 2019). Assim, o milho acabou por não ser eficiente em aportar carbono ao solo e, nesse caso, o aporte de resíduo de melhor qualidade (baixa relação C/N) pela soja compensou o aporte de resíduos um pouco maior na rotação soja/milho.

Além do sistema de cultivo de grãos no verão, as intensidades de pastejo no inverno são fatores de grande importância por afetar a dinâmica da MOS, incrementando C e N no solo das camadas superficiais. Nesse sistema, a intensidade de pastejo baixa apresentou maior teor e estoque de C e N em relação a intensidade moderada. Esse maior acúmulo pode ser justificado pelo maior aporte de C via resíduos culturais na intensidade baixa, demonstrados pela maior PTF (**Tabela 11 e Figura 10**), sendo aportados, em média, 2,7 Mg MS ha⁻¹ ano a mais em relação a intensidade moderada de pastejo. Assmann et al. (2014) observou que intensidades de pastejo baixa favoreceram os incrementos nos teores de C e N no solo, demonstrando-se mais eficientes.

Nos arranjos produtivos adotados, em que os sistemas de cultivo de verão garantem aporte de resíduos pouco expressivo, o período hibernal tem uma grande importância na manutenção dos níveis de C e N do solo. Nesse sentido, além da rotação de culturas com milho não aportar quantidade de resíduos adequada para incrementar C no solo em relação ao monocultivo de soja, ela ainda prejudica a MFR no inverno, principal fase regeneradora desse atributo (**Figura 11**), assim como observado por Neto et al. (2013). A maior MFR no monocultivo de soja pode estar relacionada à maior ciclagem e disponibilidade de nutrientes no solo, principalmente N, oriundo da fixação biológica de N. Além disso, a menor relação C/N nos resíduos culturais e a maior disponibilidade de N no solo (Russelle & Birr, 2004), pode ter impactado positivamente nos teores de NTS (**Figura 12C**). Varvel & Wilhelm (2003) também observaram que a cultura da soja pode contribuir com maiores quantidades de N a cultivos subsequentes, em comparação com o milho, podendo fornecer melhores condições de desenvolvimento para esses cultivos. Assim, em SIPA

como do presente estudo, onde o cultivo do milho não recebeu adubação nitrogenada na maioria dos cultivos, as contribuições de N para a pastagem podem ser ainda inferiores, proporcionando uma alta imobilização de N e impactando negativamente no desenvolvimento inicial da pastagem hiberna.

Além de contribuírem para o incremento nos teores e no estoque de C no solo, baixas intensidades de pastejo favoreceram a produtividade da cultura do milho, mesmo que na maioria dos anos não houvesse diferença na produtividade, apenas na safra de 2015, sempre houve tendência de obter maiores rendimentos. Baixas intensidades de pastejo ao aportarem mais C ao solo via resíduos de culturas (**Tabela 11**), incrementam os teores de C e N (**Figura 12B e 12D**). Lovato et al. (2004) demonstrou a importância do suprimento adequado de N para a cultura do milho, sendo a produtividade reduzida quando há falta do nutriente. Para esse caso, onde o milho, na maioria dos anos não recebeu adubação nitrogenada, ele dependeu ainda mais do N do solo, demonstrando que baixas intensidades de pastejo proporcionam melhores condições de suprimento de N para a cultura do milho. Além disso, uma das principais funções da MOS é gerar cargas, aumentando assim a capacidade de reter cátions como Ca, Mg e K (Ciotta et al., 2003), e de disponibilizar outros nutrientes essenciais às plantas como P, N e S. Lin et al. (2010) encontrou maior disponibilidade de NH_4^+ no solo em baixas intensidades de pastejo, sugerindo que a adoção de pastejo leve é essencial para preservar a produção da forragem e a fertilidade do solo, promovendo melhores condições para as culturas expressarem seu potencial produtivo.

A produtividade da cultura da soja apresentou respostas similares a cultura do milho, obtendo resultados superiores na intensidade de pastejo baixa na maioria dos anos avaliados, resultados que corroboram com os observados por Carvalho et al. (2010). Porém, também foi influenciada pelo método de pastoreio adotado. Na maioria dos anos o método de pastoreio rotativo obteve as maiores médias de produtividade em ambas as intensidades de pastejo, em relação ao método de pastoreio contínuo. Essa maior produtividade no método de pastoreio rotativo pode ser justificada pelo fato de que o método de pastoreio contínuo pode afetar os padrões espaciais de atributos do solo, aumentando a heterogeneidade espacial das pastagens e meio ambiente (Laca, 2009, Auerswald et al., 2010). Isso porque o animal tem livre circulação dentro da

parcela e os dejetos são depositados de forma inconstante e desuniforme, influenciando a concentração de nutrientes no solo (McNaughton, 1985; Augustine & Frank, 2001), sendo mais concentrados perto de áreas de descanso, sombra e cochos de água (Dennis et al. 2012; Debeux et al., 2014). Isso não acontece no método de pastoreio rotativo, onde os animais são alocados em faixas de pastejo que alternam no espaço e no tempo, favorecendo uma melhor distribuição das excretas dentro da área de pastejo (Peterson & Gerrish, 1996) havendo um melhor controle espacial da fertilidade do solo.

5. Conclusões

Baixas intensidades de pastejo favorecem o incremento dos teores de C e N no solo, juntamente com o aumento do estoque de C em relação a intensidade de pastejo moderada. O método de pastoreio, seja ele contínuo ou rotativo, não influencia a dinâmica do C e N.

O monocultivo de soja proporcionou teores e estoque de C e N no solo superior a rotação soja/milho devido, principalmente, às estiagens frequentes na área experimental, que comprometeram o desenvolvimento e produção da cultura do milho.

A produção da forragem residual é beneficiada pelo monocultivo da soja. Além disso, a produção de forragem e a produtividade da cultura do milho e da soja é superior em sistema com baixa intensidade de pastejo no período hibernal, sendo que no método de pastoreio rotativo, independente da intensidade adotada, a produtividade da soja é maior.

CAPÍTULO V – Conclusões e Considerações Finais

Esse estudo demonstrou que métodos e intensidades de pastejo afetam minimamente as propriedades químicas do solo devido ao poder reciclador do animal, que exporta em média apenas 3% dos nutrientes (P, K, Ca e Mg) ingeridos no pastejo. Assim, as culturas de grãos controlam os fluxos de saída de nutrientes em um sistema integrado de produção agropecuária (SIPA).

Intensidades baixas de pastejo promovem incrementos nos teores de C e N no solo, além de obter produtividades de milho e soja superiores em relação a intensidade moderada. Além disso, maiores produtividades da cultura da soja são obtidas em método de pastoreio rotativo, independente da intensidade de pastejo adotada.

Os teores e estoques de C e N no solo foram superiores no monocultivo de soja em relação a rotação soja/milho. Assim, devido aos frequentes riscos de estiagens em ambientes de clima subtropical, a rotação de culturas com o milho deve ser melhor planejada, pois embora tenha um grande potencial em aportar resíduos ao solo, a cultura da soja aporta um resíduo de melhor qualidade e, por ser menos susceptível a estresses hídricos, pode ser mais eficiente em aumentar/manter os estoques de C em locais onde há limitação hídrica no período estival.

Referências Bibliográficas

- ALLEN, V.G. *et al.* Integrated irrigated crop-livestock systems in dry climates. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 2, p. 346-360, 2007.
- ALVAREZ, C. *et al.* Carbon and nitrogen sequestration in soils under different management in the semi-arid Pampa (Argentina). **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 142, p. 25-31, 2014.
- ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 325-380, 2013.
- 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.
- ASSMANN, J. M. *et al.* Carbon and nitrogen cycling in an integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 10, p. 967-978, 2015.
- 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.
- AUERSWALD, K.; MAYER, F.; SCHNYDER, H. Coupling of spatial and temporal pattern of cattle excreta patches on a low intensity pasture. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 88, n. 2, p. 275-288, 2010.
- AUGUSTINE, D. J.; FRANK, D. A. Effects of migratory grazers on spatial heterogeneity of soil nitrogen properties in a grassland ecosystem. **Ecology**, Washington, v. 82, n. 11, p. 3149-3162, 2001.
- BARTHAM, G. T. *et al.* Experimental techniques: the HFRO sward stick. **Biennial report**, Indianapolis, v. 1985, p. 29-30, 1984.
- BAYER, C. *et al.* A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, n. 1-2, p. 217-226, 2006.
- BOENI, M. *et al.* Organic matter composition in density fractions of Cerrado Ferralsols as revealed by CPMAS ¹³C NMR: Influence of pastureland, cropland and integrated crop-livestock. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 80-86, 2014.
- BOITT, G. *et al.* Fate of phosphorus applied to soil in pig slurry under cropping in southern Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 321, p. 164-172, 2018.

- BORKERT, C. M. *et al.* Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 1, p. 143-153, 2003.
- BRUM, A. L.; MÜLLER, P. K. A realidade da cadeia do trigo no Brasil: o elo produtores/cooperativas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Rio de Janeiro, v. 46, n. 1, p. 145-169, 2008.
- BÜNEMANN, E. K. *et al.* Soil quality—A critical review. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 120, p. 105-125, 2018.
- CAI, Z. *et al.* Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China. **Journal of Soils and Sediments**, Berlin, v. 15, n. 2, p. 260-270, 2015.
- CAMPOS, B. M. **Estabelecimento do azevém anual em sistemas integrados de produção agropecuária**: implicações do resíduo das lavouras de soja e milho. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- CARVALHO, P. C. F. *et al.* Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 88, n. 2, p. 259-273, 2010.
- 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.
- CECAGNO, D. *et al.* Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 156, p. 54-62, 2016.
- CHEN, D. *et al.* Effects of nitrogen enrichment on belowground communities in grassland: Relative role of soil nitrogen availability vs. soil acidification. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 89, p. 99-108, 2015.
- CHEN, J. *et al.* Does maize and legume crop residue mulch matter in soil organic carbon sequestration? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 265, p. 123-131, 2018.
- CICEK, H. *et al.* Effects of grazing two green manure crop types in organic farming systems: N supply and productivity of following grain crops. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 27-36, 2014.
- CIOTTA, M. N. *et al.* Soil organic matter and cation exchange capacity increase in a low activity clay soil under no-tillage system. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1161-1164, 2003.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safra 2018/2019: primeiro levantamento. Acompanhamento da safra brasileira: grãos, Brasília, v. 6, n. 1, p. 1-129, out. 2018. Monitoramento agrícola. Projeto Observatório Agrícola. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info->

agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/22459_07172d10b7104ce2765c1734d0f7e857. (Acesso em: 30 out. 2018).

CONAB-COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série histórica das safras**: milho: 1ª Safra. Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=20>. Acesso em: 17 fev. 2019.

CONANT, R. T. *et al.* Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. **Ecological Applications**, Washington, v. 27, n. 2, p. 662-668, 2017.

CONANT, R. T. *et al.* Temperature and soil organic matter decomposition rates—synthesis of current knowledge and a way forward. **Global Change Biology**, Oxford, v. 17, n. 11, p. 3392-3404, 2011.

CONTE, O. *et al.* Densidade, agregação e frações de carbono de um Argissolo sob pastagem natural submetida a níveis de ofertas de forragem por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 35, n. 2, p. 579-587, 2011.

COTRUFO, M. F. *et al.* The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? **Global Change Biology**, Oxford, v. 19, n. 4, p. 988-995, 2013.

CRUSCIOL, C. A. C. *et al.* Nitrate role in basic cation leaching under no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 35, n. 6, p. 1975-1984, 2011.

DAS, T. K. *et al.* Conservation agriculture effects on crop and water productivity, profitability and soil organic carbon accumulation under a maize-wheat cropping system in the North-western Indo-Gangetic Plains. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 215, p. 222-231, 2018.

DE NEVE, S. Organic matter mineralization as a source of nitrogen. *In*: TEI, F.; NICOLA, S.; BENINCASA, P. (ed.). **Advances in research on fertilization management of vegetable crops**. Cham, Switzerland: Springer, 2017. p. 65-83.

DEISS, L. *et al.* Soil phosphorus compounds in integrated crop-livestock systems of subtropical Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 274, p. 88-96, 2016.

DENNIS, S. J. *et al.* Measuring excreta patch distribution in grazed pasture through low-cost image analysis. **Grass and Forage Science**, Oxford, v. 68, n. 3, p. 378-385, 2013.

DONG, W. *et al.* Effect of plough pans on the growth of soybean roots in the black-soil region of northeastern China. **Journal of Integrative Agriculture**, Beijing, v. 16, n. 10, p. 2191-2196, 2017.

DUBEUX, J. C. B. *et al.* Stocking method, animal behavior, and soil nutrient redistribution: How are they linked?. **Crop Science**, New York, v. 54, n. 5, p. 2341-2350, 2014.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. amp. Brasília: EMBRAPA, 2013. 353 p.

ENTZ, M. H. *et al.* Evolution of integrated crop-livestock production systems. *In*: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 20., 2005. Dublin. **Grassland: a global resource**. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2005. p. 137-148. Papers apresentados no 20º Congresso Internacional de Pastagem realizado na Universidade de Dublin em 2005.

ERNANI, P. R. *et al.* Potássio. *In*: NOVAIS, R. F. *et al* (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 551-594.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Livestock in the balance. *In*: FAO. **The state of food and agriculture**, Rome, Part 1, p. 1-100, 2009. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i0680e/i0680e.pdf>. Acesso em: 27 out. 2018.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Sete lagoas consensus. *In*: FAO. **An international consultation on integrated crop-livestock systems for development: the way forward for sustainable production intensification**. Rome: FAO, 2010. cap. 1. p. 1-4. (Integrated Crop Management, v. 13). Disponível em: http://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/images/iclsd/documents/crop_1livestock_proceedings.pdf. Acesso em: 24 out. 2018.

FERREIRA, A. O. *et al.* Can no-till grain production restore soil organic carbon to levels natural grass in a subtropical Oxisol?. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 229, p. 13-20, 2016.

FLORES, J. P. C. *et al.* Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 31, n. 4, p. 771-780, 2007.

FLORES, J. P. C. *et al.* Atributos químicos do solo em função da aplicação superficial de calcário em sistema de integração lavoura-pecuária submetido a pressões de pastejo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, n. 6, p. 2385-2396, 2008.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A. Surface soil changes during twelve years of pasture management in the Southern Piedmont USA. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, n. 6, p. 2131-2141, 2010.

GATIBONI, L. C. *et al.* Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 31, n. 4, p. 691-699, 2007

GATIBONI, L. C. *et al.* Soil phosphorus thresholds in evaluating risk of environmental transfer to surface waters in Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 39, n. 4, p. 1225-1234, 2015.

GHOSH, S. *et al.* Changes in soil organic carbon pool in three long-term fertility experiments with different cropping systems and inorganic and organic soil amendments in the eastern cereal belt of India. **Soil Research**, Collingwood, v. 48, n. 5, p. 413-420, 2010.

HAYNES, R. J.; WILLIAMS, P. H. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. **Advances in agronomy**, San Diego, v. 49, n. 8, p. 119-199, 1993.

HAVLIN, J. L. *et al.* Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 2, p. 448-452, 1990.

HEDLEY, M. J.; BOLAN, N. S. Role of carbon, nitrogen, and sulfur cycles in soil acidification. *In*: RENGEL, Z. (ed.). **Handbook of Soil Acidity**. New York: M. Dekker, c2003. p. 43-70.

HINSINGER, P. *et al.* Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. **Plant and Soil**, The Hague, v. 248, n. 1-2, p. 43-59, 2003.

HOEGBERG, P. *et al.* Tree growth and soil acidification in response to 30 years of experimental nitrogen loading on boreal forest. **Global Change Biology**, Oxford, v. 12, n. 3, p. 489-499, 2006.

HOUX III, J. H.; WIEBOLD, W. J.; FRITSCHI, F. B. Long term tillage treatment effects on corn grain nutrient composition and yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 191, p. 33-40, 2016.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa da Pecuária Municipal 2017**: tabela 3939: efetivo dos rebanhos, por tipo de rebanho, 2008 a 2017. [Rio de Janeiro, 2017]. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3939>. Acesso em: 17 fev. 2019.

KAMINSKI, J. *et al.* Proposta de nova equação para determinação do valor de H + Al pelo uso do índice SMP em solos do RS e de SC. *In*: REUNIÃO ANUAL DA REDE OFICIAL DE LABORATÓRIOS DE ANÁLISE DE SOLO E DE TECIDO VEGETAL DOS ESTADOS DO RIO GRANDE DO SUL E DE SANTA CATARINA, 33., 2001, Frederico Westphalen. **Ata [...]**. Frederico Westphalen, 2001. p. 21-26.

KARLEN, D. L. *et al.* Crop rotation effects on soil quality at three northern corn/soybean belt locations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 3, p. 484-495, 2006.

- KIRSCHBAUM, M. U. F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 27, n. 6, p. 753-760, 1995.
- KOTTEK, M. et al. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006.
- LACA, E. A. New approaches and tools for grazing management. **Rangeland Ecology & Management**, Lakewood, v. 62, n. 5, p. 407-417, 2009.
- LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, New York, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004.
- 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.
- LIN, Y. et al. Grazing intensity affected spatial patterns of vegetation and soil fertility in a desert steppe. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 138, n. 3-4, p. 282-292, 2010.
- LOGES, R. *et al.* Forage production in rotational systems generates similar yields compared to maize monocultures but improves soil carbon stocks. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 97, p. 11-19, 2018.
- LOVATO, T. *et al.* Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, n. 1, p. 175-187, 2004.
- LUCAS, R. W. *et al.* A meta-analysis of the effects of nitrogen additions on base cations: implications for plants, soils, and streams. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, n. 2, p. 95-104, 2011.
- LUNARDI, R. *et al.* Rendimento de soja em sistema de integração lavoura-pecuária: efeito de métodos e intensidades de pastejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 3, p. 795-802, 2008.
- MANZONI, S. *et al.* The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization. **Science**, New York, v. 321, n. 5889, p. 684-686, 2008.
- MAO, Q. *et al.* Effects of long-term nitrogen and phosphorus additions on soil acidification in an N-rich tropical forest. **Geoderma**, Amsterdam, v. 285, p. 57-63, 2017.
- MARTINS, A. P. *et al.* Amelioration of soil acidity and soybean yield after surface lime reapplication to a long-term no-till integrated crop-livestock system under varying grazing intensities. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 144, p. 141-149, 2014.
- MAZZILLI, S. R. *et al.* Greater humification of belowground than aboveground biomass carbon into particulate soil organic matter in no-till corn and soybean crops. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 85, p. 22-30, 2015.

- MBUTHIA, L. W. *et al.* Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 89, p. 24-34, 2015.
- MCNAUGHTON, S. J. Ecology of a grazing ecosystem: the Serengeti. **Ecological Monographs**, Durham, v. 55, n. 3, p. 259-294, 1985.
- MICHEL, K.; MATZNER, E. Response of enzyme activities to nitrogen addition in forest floors of different C-to-N ratios. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 38, n. 2, p. 102-109, 2003.
- MOOJEN, F. G. **Estudo de longa duração em sistema integrado de produção agropecuária: explorando relações planta-animal na fase pastagem**. 2017. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- MORAES, A. *et al.* Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 57, p. 4-9, 2014.
- MOTT, G. O.; LUCAS, H. L. The design conduct and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. In: **International grassland congress**. 1952. p. 1380-1395.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (US). Subcommittee on sheep nutrition. **Nutrient requirements of sheep**. 5th rev. ed. Washington, DC: National Academy of Sciences, 1975.
- NETO, A. B. *et al.* Perfilhamento em pastagens de azevém em sucessão a soja ou milho, sob diferentes métodos e intensidades de pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 3, p. 329-338, 2013.
- OLOFSSON, J.; MAZANCOURT, C.; CRAWLEY, M. J. Spatial heterogeneity and plant species richness at different spatial scales under rabbit grazing. **Oecologia**, Berlin, v. 156, n. 4, p. 825-834, 2008.
- OOSTEROM, E. J. V. *et al.* Hybrid variation for root system efficiency in maize: potential links to drought adaptation. **Functional plant biology**, Collingwood, v. 43, n. 6, p. 502-511, 2016.
- PETERSON, P. R.; GERRISH, J. R. Grazing systems and spatial distribution of nutrients in pastures: Livestock management considerations. **Nutrient cycling in forage systems**. Columbia, p. 203-212, 1996.
- PEYRAUD, J. L.; TABOADA, M.; DELABY, L. Integrated crop and livestock systems in Western Europe and South America: a review. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 57, p. 31-42, 2014.
- POEPLAU, C.; DON, A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops—A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 200, p. 33-41, 2015.

- REEDER, J. D.; SCHUMAN, G. E. Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed-grass and short-grass rangelands. **Environmental Pollution**, Amsterdam, v. 116, n. 3, p. 457-463, 2002.
- RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; FLORES, A. F. Organic and inorganic phosphorus as characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance in subtropical soils under management systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 33, n. 11-12, p. 1853-1871, 2002.
- RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems under subtropical conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, n. 15-16, p. 2339-2354, 2003.
- RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, 2008.
- RUSSELLE, M. P.; ENTZ, M. H.; FRANZLUEBBERS, A. J. Reconsidering integrated crop–livestock systems in North America. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 2, p. 325-334, 2007.
- RUSSELLE, M. P.; BIRR, A. S. Large-scale assessment of symbiotic dinitrogen fixation by crops. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, n. 6, p. 1754-1760, 2004.
- SÁ, J. C. M. *et al.* Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, Amsterdam, v. 98, p. 102-112, 2017.
- SALTON, J. C. *et al.* Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1349-1356, 2011.
- SHOEMAKER, H. E.; MCLEAN, E. O.; PRATT, P. F. Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminum 1. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 25, n. 4, p. 274-277, 1961.
- 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.
- SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 5, p. 1350-1358, 1999.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. NÚCLEO REGIONAL SUL.COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO-RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre: SBCS, 2016.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. NÚCLEO REGIONAL SUL.COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO-RS/SC. **Recomendações de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 3 ed. Passo Fundo: SBCS, 1995.

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**, Campinas, 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**, Campinas, v. 33, n. 6, p. 1829-1836, 2009.

SPARKS, D. L. Inorganic soil components. *In*: SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. 2nd ed. Amsterdam; London: Academic Press, c2003. Chapter 2. p. 43-72.

SPOHN, M. Microbial respiration per unit microbial biomass depends on litter layer carbon-to-nitrogen ratio. **Biogeosciences**, Katlenberg-Lindau, v. 12, n. 3, p. 817-823, 2015.

TEDESCO, M. J. *et al.* **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. rev. e ampl. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 147 p. (Boletim Técnico, 5).

TIAN, D.; NIU, S. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 10, n. 2, p. 024019, 2015.

TIECHER, T. *et al.* Soil fertility and nutrient budget after 23-years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical Oxisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 308, p. 78-85, 2017.

VARVEL, G. E.; WILHELM, W. W. Soybean nitrogen contribution to corn and sorghum in western Corn Belt rotations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, n. 5, p. 1220-1225, 2003.

VELOSO, M. G. *et al.* High carbon storage in a previously degraded subtropical soil under no-tillage with legume cover crops. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 268, p. 15-23, 2018.

VIAUD, V. *et al.* Landscape-scale analysis of cropping system effects on soil quality in a context of crop-livestock farming. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 265, p. 166-177, 2018.

WEST, T. O.; POST, W. M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 6, p. 1930-1946, 2002.

WHALEN, J. K.; CHANG, C. Phosphorus accumulation in cultivated soils from long-term annual applications of cattle feedlot manure. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 30, n. 1, p. 229-237, 2001.

WILLIAMS, Peter. Nutritional composition of red meat. **Nutrition & Dietetics**, Deakin, v. 64, p. S113-S119, 2007.

Apêndices

1. Artigo publicado na revista *Geoderma* referente ao terceiro capítulo da dissertação.

Geoderma 351 (2019) 197–208



Contents lists available at ScienceDirect

Geoderma

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



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



Lucas Aquino Alves^{a,*}, Luiz Gustavo de Oliveira Denardin^a, Amanda Posselt Martins^b, Ibanor Anghinoni^b, Paulo César de Faccio Carvalho^c, Tales Tiecher^b

^aGraduate Program in Soil Science, Interdisciplinary Research Group on Environmental Biogeochemistry (IRGEB), Federal University of Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves Avenue 7712, 91540-000 Porto Alegre, RS, Brazil

^bDepartment of Soil Science, Interdisciplinary Research Group on Environmental Biogeochemistry (IRGEB), Federal University of Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves Avenue 7712, 91540-000 Porto Alegre, RS, Brazil

^cDepartment of Animal Science, Grazing Ecology Research Group, Federal University of Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves Avenue 7712, 91540-000 Porto Alegre, RS, Brazil

ARTICLE INFO

Handling Editor: Junhong Bai

Keywords:

No-tillage
Subtropical soil
Nutrient budget
Grazing intensity
Stocking method

ABSTRACT

The insertion of the animal component into the crop production system can alter the nutrient dynamics and, consequently, the soil fertility status over time. This change occurs differently according to the arrangement adopted, depending on both, the intensity and frequency of animal grazing, as well as the crop rotation system. This study was carried out aiming to evaluate the effect of sheep grazing intensity and frequency during the winter period and the crop rotation in the summer period on the (i) temporal evolution and vertical distribution of soil chemical properties, and (ii) on the nutrient (phosphorus – P, potassium – K, calcium – Ca, and magnesium – Mg) budget. The experiment was established in 2003, in a subtropical Acrisol in southern Brazil, arranged in a randomized block design with split plots. The treatments were two grazing intensities (moderate and low), two stocking methods (continuous and rotational), subdivided into two crop rotation systems (monoculture - soybean/soybean and crop rotation soybean/maize). Temporal variation of soil pH, exchangeable aluminum (Al), Ca and Mg, available P and K, base saturation, Al saturation, and cation exchange capacity (CEC) were evaluated in samples collected in 2003, 2010, 2015 and 2017, corresponding to 0, 7, 12 and 14-years after the beginning of the experiment. The vertical distribution (0–5, 5–10, 10–20, 20–30 and 30–40 cm) of these chemical properties were also evaluated 14-years after the beginning of the experiment (2017). The nutrient budget in the soil was calculated based on the initial and final available/exchangeable contents in the 0–10 cm soil layer and the inputs (fertilizers) and outputs (exportation by grain and meat) of nutrients. > 95% of P, K, Ca and Mg were exported by grains and < 5% by sheep meat. There was an intense acidification of the soil over the 14-years of experiment as shown by the decrease of soil pH and base saturation, and the increase of Al saturation. Crop rotation with soybean/maize increased CEC up to 5 cm soil depth and increased the available K content up to 40 cm soil depth. The available K budget was more negative in soybean monoculture due to higher grain exportation. Integrated crop-livestock system involving low grazing intensities and rotational stocking methods, coupled with crop rotation in the summer, was more efficient in the use of nutrients.

1. Introduction

Brazil is one of the largest grain producers in the world and has the fifth largest cultivated area. Moreover, Brazil is among the 17 largest producers of sheep in the world. In the last year (2017/2018) 61.5 million hectares were cultivated with commercial crops. In Rio Grande

do Sul, the southernmost state of Brazil, with the third largest agricultural production, the crop area is approximately 6.5 million hectares, mainly cultivated with soybean (89% of the area) and maize (11% of the area). The Rio Grande do Sul State has also the largest sheep flock in Brazil, with approximately 4.0 million head mainly managed for mutton production. However, in the winter period only

* Corresponding author.

E-mail address: lucas.aquino@ufrgs.br (L.A. Alves).

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.036>

Received 27 November 2018; Received in revised form 15 April 2019; Accepted 22 April 2019
0016-7061/ © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

2. Artigo publicado na revista *Soil & Tillage Research* referente ao quarto capítulo da dissertação.

Soil & Tillage Research 203 (2020) 104678



Contents lists available at ScienceDirect

Soil & Tillage Research

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



The effect of crop rotation and sheep grazing management on plant production and soil C and N stocks in a long-term integrated crop-livestock system in Southern Brazil



Lucas Aquino Alves^{a,*}, Luiz Gustavo de Oliveira Denardin^a, Amanda Posselt Martins^b, Cimélio Bayer^b, Murilo Gomes Veloso^b, Carolina Bremm^c, Paulo César de Faccio Carvalho^c, Debora Rubin Machado^d, Tales Tiecher^{b,*}

^a Graduate Program in Soil Science, Interdisciplinary Research Group on Environmental Biogeochemistry (IRGEB), Federal University of Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves Avenue 7712, 91540-000 Porto Alegre, RS, Brazil

^b Department of Soil Science, IRGEB, Federal University of Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves Avenue 7712, 91540-000 Porto Alegre, RS, Brazil

^c Animal Science Research Program, Federal University of Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves Avenue 7712, 91540-000 Porto Alegre, RS, Brazil

^d Graduate Program in Animal Science, Grazing Ecology Research Group, Federal University of Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves Avenue 7712, 91540-000 Porto Alegre, RS, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:
Grazing intensities
Stocking methods
Soybean
Maize
Annual ryegrass

ABSTRACT

Integrated crop-livestock systems (ICLS) conducted under no-tillage have been shown to favour the accumulation of carbon (C) and nitrogen (N) in soil. In that systems, however, C and N accumulation in soil might depend on pasture management and the type of crop rotation used. The objective of this study was to evaluate the impact of two stocking methods (continuous and rotational) and two sheep grazing intensities (moderate and low) on winter pasture and the effect of summer crop rotation (soybean and/or maize) on crop yield and C and N stocks in an Acrisol after 14-yr under experimental conditions. The evaluated ICLS was set up for grain yield in the summer crop phase and for sheep meat production in the winter pasture phase. Pasture production, soybean and corn yield were evaluated throughout the experimental period. After 14-yr, the soil was sampled at the 0–5, 5–10, 10–20 and 20–30 cm layers to evaluate the content and stock of C and N. Higher C and N contents in soil superficial layers (0–5 and 5–10 cm) were observed under low grazing intensity in winter and soybean monoculture in summer. The C and N stocks in 0–30 cm soil layer ranged between 39 and 45 Mg C ha⁻¹ and 4 and 5 Mg N ha⁻¹, respectively. C and N stocks in the soil were significantly related to N added through the residues of pasture and summer crop. This positive relationship is possibly explained by the higher efficiency of microbes in using crop residues enriched in N with posterior stabilization of microbial residues through organo-mineral association in the soil. The higher content and stocks of C and N associated with low intensity grazing favoured a higher maize yield (40%) compared to moderate grazing intensity in the 2015/2016 season. According to our results, the accumulation of C and N in the soil under ICLS involving low grazing intensity in the winter and soybean monoculture in the summer was related to the N added/recycled by the soybean and by the hibernal pasture.

1. Introduction

Soil organic matter (SOM) influences the chemical, physical and biological conditions in the soil as well as determining its productive capacity (Lal, 2004; Ghosh et al., 2010). The SOM content is affected by soil management, especially no-tillage, and crop systems with high input of plant residues have been shown as strategies to favour SOM accumulation (Bayer et al., 2006; Veloso et al., 2018). In addition to

quantity, the residues with better quality (greater N content) may result in a greater efficiency of substrate use by the microbiota and contributing to accumulation of C and N in the soil (Cotrufo et al., 2013, 2015).

Integrated crop-livestock systems (ICLS) are defined as systems in which there is temporary alternation or rotation of pastures and crops in the same area over time (Momes et al., 2014), contributing to the accumulation of C and N in the soil (Sá et al., 2017; Luz et al., 2019). C

* Corresponding authors.

E-mail addresses: lucas.aquino@ufrgs.br (L.A. Alves), tales.tiecher@ufrgs.br (T. Tiecher).

<https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104678>

Received 16 September 2019; Received in revised form 3 March 2020; Accepted 30 April 2020
0167-1987/ © 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

Resumo Biográfico

Natural de Quevedos, região central do estado do Rio Grande do Sul, filho de Ilza Maria Aquino Alves e Volmar de Oliveira Alves, ambos agropecuaristas. Possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Santa Maria, campus de Frederico Westphalen - RS (Março de 2012 - Janeiro de 2017). Mestre em Ciência do Solo pelo Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGCS - UFRGS), com dissertação intitulada "Atributos químicos do solo em sistemas integrados de produção de grãos e ovinos de corte" (Abril de 2017 - Março de 2019).