

SISTEMAS INTEGRADOS DE CULTIVO E PECUÁRIA EM TERRAS BAIXAS DO SUL DO BRASIL: IMPLICAÇÕES SOBRE ATRIBUTOS FÍSICOS E ESTOQUES DE CARBONO ORGÂNICO DO SOLO

Jardel Böhmer Junior

Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Pelotas, RS, Brasil
jardelbohmer7777@hotmail.com

Cláudia Liane Rodrigues de Lima

Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Pelotas, RS, Brasil
cirlima@yahoo.com.br

Lizete Stumpf

Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Pelotas, RS Brasil
zete.stumpf@gmail.com

Adilson Luís Bamberg

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, Brasil
adilson.bamberg@embrapa.br

Karen Raquel Pening Klitzke

Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Pelotas, RS Brasil
karenrpklitzke@gmail.com

RESUMO

Solos de terras baixas apresentam-se em condições de elevado hidromorfismo, dificultando o cultivo de espécies de sequeiro e adoção dos princípios da agricultura conservacionista. A rotação de culturas, com espécies de interesse econômico, visa à sustentabilidade dos sistemas de produção e à melhoria da qualidade física do solo. Objetivou avaliar a influência de sistemas integrados de cultivos anuais de grãos e de pecuária sobre a qualidade física e química de um Planossolo. O estudo avaliou quatro áreas agrícolas, localizadas nos municípios de Capão do Leão e Arroio Grande no RS, com coletas de amostras indeformadas nas camadas 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m considerando os atributos físicos (densidade, porosidade, agregados estáveis e curva de retenção de água do solo), e químico (estoques de carbono orgânico). Concluiu-se que o sistema integrado constituído por lavoura-pecuária sob camalhões de base larga apresentou limitações na qualidade física do solo, com menores valores médios de porosidade total e de estoques de carbono, provavelmente pela carga animal adotada. Verificou-se que a qualidade do solo em terras baixas, pode ser melhorada pelo uso da rotação de culturas anuais (soja) e pelo aumento das taxas anuais de adição de resíduos orgânicos em sistemas integrados de cultivos.

Palavras-chave: Qualidade do solo. Sustentabilidade. Arroz. Soja. Planossolo.

INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS IN LOWLANDS OF SOUTHERN BRAZIL: IMPLICATIONS FOR SOIL PHYSICAL ATTRIBUTES AND ORGANIC CARBON STOCKS

ABSTRACT

Lowland soils exhibit conditions of high hydromorphism, which poses a challenge for the introduction of upland species and the adoption of conservation agriculture principles. Crop rotation with economically valuable species has been tested as a strategy to promote the sustainability of production systems and improve the physical quality of lowland soils. This study aimed to evaluate the influence of integrated annual grain cropping and livestock systems on the physical and chemical quality of a Planosol. Four agricultural areas located in the municipalities of Capão do Leão and Arroio Grande, in the state of Rio Grande do Sul (RS), were assessed. Undisturbed soil samples were collected at depths of 0.00–0.05 m, 0.05–0.10 m, and 0.10–0.20 m. Physical attributes (density, porosity, water-stable aggregates, and soil-water retention curve) and chemical attributes (soil organic carbon stocks) were analyzed. The results showed that the integrated crop-livestock system conducted on broad-base ridges presented limitations in soil physical quality, with lower mean values of total porosity and carbon stocks, likely due to a high livestock load pressure. This

study concluded that the quality of lowland soils could be improved through the adoption of annual crop rotations and increased annual inputs of organic residues in integrated cultivation systems.

Keywords: Soil Quality. Sustainability. Rice. Soybean. Planosol.

INTRODUÇÃO

Em terras baixas do Sul do Brasil, apesar dos avanços científicos e tecnológicos observados na última década em relação aos princípios da agricultura conservacionista, ainda predominam sistemas de cultivo sob pregaro convencional, que envolvem o revolvimento anual da camada arável do solo. Nessas áreas, por muito tempo, cultivou-se arroz e manteve-se o solo por cerca de três anos consecutivos sob pousio ou pecuária extensiva, combinando a sucessão de arroz irrigado no verão e, no inverno, a criação extensiva de bovinos de corte (Correia et al., 2013). Recentemente, a diversificação de culturas de estação quente com soja e milho tem ganhado espaço (Parfitt et al., 2015). Entretanto, ainda há desafios tecnológicos que precisam ser superados, como a adaptação de cultivares e espécies forrageiras, a drenagem e os ajustes na intensidade de pastejo e na carga animal, para viabilizar a adoção eficiente e segura de sistemas integrados de produção sustentável em terras baixas no Sul do Brasil.

A soja vem sendo a principal alternativa de aumento de renda para muitos agricultores da região. Por apresentar menores custos de produção, liquidez de comercialização e adaptabilidade regional, vem proporcionando melhor controle de plantas invasoras (arroz vermelho e capim-arroz), que historicamente limitam o potencial produtivo de arroz irrigado, principal cultivo nas terras baixas do Sul do RS. Sistemas de cultivo como o sulco-camalhão (Hirakuri et al., 2021) e os camalhões de base larga (Rosso et al., 2018) possibilitam o cultivo em ambientes de elevado hidromorfismo, incluindo também novas cultivares mais adaptadas a esse meio, além da adequação da estrutura de estradas e da macrodrenagem das áreas. Todavia, ainda é necessário o aperfeiçoamento desses sistemas para potencializar a produtividade de culturas não plenamente adaptadas a essas regiões (Timm et al., 2017).

O desafio para as culturas como a soja e o milho está atrelado ao fato de que, na maior parte do ano, há excesso de água no solo. Por isso, características do solo mais adequadas, que sejam também compatíveis com o cultivo de arroz, e infraestrutura adequada de drenagem dos talhões são fatores importantes para o melhor desempenho de sistemas integrados de produção em terras baixas, contornando as principais deficiências intrínsecas desses tipos de solos, como os baixos valores de infiltração, permeabilidade de água, macroporos e porosidade de aeração (Ribeiro et al., 2016).

Para estabelecer sistemas de produção de forma sustentável em terras baixas, o planejamento tanto da rotação como da sucessão de culturas deve considerar, além das exigências das plantas, as condições edafoclimáticas e se o local está ou não adequado para a implantação de determinadas culturas. A adoção de sistemas de cultivo adequados e sustentáveis promove a manutenção ou o aumento de estoques de carbono no solo, uma vez que favorece um balanço mais equilibrado entre as adições e perdas de resíduos. Nesse contexto, o sistema plantio direto é amplamente reconhecido por promover menores taxas de decomposição quando comparado ao sistema de pregaro convencional (Da Silva; Marchesan; Schoenfeld, 2017). Como consequência, o aumento nos estoques de carbono melhora a qualidade do solo (Da Silva; Marchesan; Schoenfeld, 2017), viabilizando as culturas de sequeiro, que demandam melhores condições físicas para o bom desempenho produtivo.

Visando à diversificação de culturas em terras baixas, sistemas de cultivo e pregaro do solo que superem as limitações impostas pelo hidromorfismo têm sido propostos, avaliados e aprimorados. O sistema sulco-camalhão permite que as culturas de soja e milho sejam cultivadas com relativo sucesso em lavouras da região, pois viabiliza tanto a irrigação quanto a drenagem, aumentando a produtividade de grãos. Desde 2014, pesquisadores observaram que a produtividade da soja sob esse sistema obteve aumento de 10% (+529 kg ha⁻¹) e 9% (+362 kg ha⁻¹) nos anos agrícolas de 2014/2015 e 2015/2016, pois essa associação melhora o estabelecimento das plantas, fornece condições físico-hídricas mais favoráveis e beneficia a fixação biológica de nitrogênio, permitindo maior rentabilidade aos produtores por meio da soja rotacionada com arroz irrigado (Cassol et al., 2020). Melo et al. (2021) corroboram que a utilização do sistema sulco-camalhão favorece tanto o crescimento quanto o desenvolvimento

das plantas ao diminuir o encharcamento do solo, criando um ambiente mais adequado para o desenvolvimento radicular das plantas cultivadas.

Além dos tipos de sistemas utilizados, cita-se a Integração Lavoura-Pecuária (ILP), que é capaz de adequar-se a diversos tipos de propriedade, de pequeno a grande porte. Esse sistema tem se mostrado capaz de potencializar o uso de áreas degradadas e com baixa produtividade, aumentando assim a lucratividade agrícola. Seu funcionamento envolve o manejo da pecuária, principalmente de bovinos, utilizando uma área de cultivo (lavoura) em rotação entre as espécies comumente utilizadas e aquelas destinadas à alimentação dos animais (pastagem). O sistema ILP, quando conduzido de forma eficiente, além de aumentar de renda do produtor, possibilita maior eficiência no uso de recursos naturais e melhora da qualidade do solo (Andrade *et al.*, 2021).

Nos sistemas que envolvem ILP, ainda existem desafios, como a necessidade de ajustar a intensidade de pastejo e a carga animal. Intensidades moderadas de pastejo podem melhorar a qualidade do solo, enquanto intensidades elevadas reduzem os teores de matéria orgânica, como observado por De Souza *et al.*, (2009) em um Latossolo Vermelho distroférico. Spera *et al.* (2009) indicaram que a elevada carga animal compromete a qualidade do solo, retirando grande quantidade de palha e de nutrientes, o que intensifica a decomposição dos resíduos culturais.

Ao longo do tempo, tem se intensificado a busca de alternativas de manejo que visem à manutenção da matéria orgânica e que promovam um solo de melhor qualidade. A escolha de sistemas sustentáveis de uso e manejo, por sua vez, também permite mitigar a emissão de CO₂ e de outros gases de efeito estufa para a atmosfera (Sales *et al.*, 2018). Scivittaro *et al.* (2017) verificaram que o cultivo de soja e sorgo forrageiro reduziu a emissão de metano (CH₄) e aumentou a emissão de óxido nitroso (N₂O), em comparação ao cultivo de arroz irrigado. Porém, a redução do CH₄ foi mais significativa que o aumento das emissões de N₂O. Os autores recomendam a diversificação dos sistemas de cultivo com culturas de sequeiro em rotação com o arroz irrigado, pois esse tipo de manejo também reduz a emissão dos gases de efeito estufa, quando comparado ao tradicional cultivo de arroz irrigado por inundaçāo.

Sistemas de cultivo adequados e sustentáveis podem promover a manutenção ou aumento dos estoques de carbono do solo em terras baixas no Sul do Brasil, os quais normalmente adotam rotação/sucessão de arroz com culturas de verão ou pastagens.

Dessa forma, este trabalho avaliou a influência de quatro sistemas integrados de cultivos anuais de grãos e pecuária, a partir da análise de atributos físicos e de estoques de carbono orgânico, em terras baixas do Sul do Brasil.

METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido em quatro áreas conduzidas sob diferentes sistemas de cultivo e preparo, sendo três delas, localizadas no município de Capão do Leão e uma em Arroio Grande, ambas no RS. Duas delas situam-se na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, estando sob as coordenadas geográficas 31° 49' 04.13" S e 52° 27' 53.77" O. As demais referem-se a uma propriedade rural situada em Capão do Leão (31° 50' 25.3" S e 52° 35' 08.8" O) e outra em Arroio Grande (32° 04' 22,5" S e 52° 43' 00,5" O). Os solos das áreas avaliadas apresentam distribuições granulométricas e classes texturais similares entre si, e integram a Unidade de Mapeamento Pelotas e são classificados como Planossolos Háplicos eutróficos solódicos (Streck *et al.*, 2018), com classe textural franca e franco-argilosa (Tabela 1).

Tabela 1 - Teores de areia, silte e argila de um Planossolo, nas camadas de 0,0-0,05 m, 0,05 - 0,10 e 0,10 - 0,20m, cultivado sob diferentes sistemas integrados de produção agrícola.

Minerais	Arroz-Arroz/ Soja-Soja	Lavoura- Pecuária	Arroz-Pousio/ Pousio-Pousio	Arroz-Soja/ Arroz-Soja
0,00-0,05 m				
Areia (%)	36,09	42,37	40,10	48,83
Silte (%)	51,82	44,92	42,81	40,52
Argila (%)	12,09	12,72	17,09	10,65
Classe Textural	Franco-argilosa	Franca	Franca	Franca
0,05-0,10 m				

Areia (%)	37,39	39,90	40,95	42,30
Silte (%)	49,23	44,95	41,35	43,85
Argila (%)	13,38	15,15	17,70	13,86
Classe Textural	Francia	Francia	Francia	Francia
0,10-0,20 m				
Areia (%)	37,57	37,44	43,17	49,75
Silte (%)	49,69	47,32	39,72	40,29
Argila (%)	12,74	15,25	17,11	9,96
Classe Textural	Francia	Francia	Francia	Francia

Fonte: Os autores, 2024.

A localização dos sistemas integrados de cultivo e o preparo, considerando os tipos de solos, é apresentada na Figura 1, enquanto a descrição das principais características de cada sistema de cultivo e preparo está no Quadro 1.

Quadro 1 - Descrição das características dos sistemas integrados de produção agrícola

Sistema de cultivo e preparo do solo	Sequência adotada
SCAP - Sistema convencional de cultivo de terras baixas do RS: Arroz Irrigado - Pousio - Pousio – Pousio (pecuária de corte extensiva)	<ul style="list-style-type: none"> - Verão: cultivo de arroz irrigado sob preparo convencional do solo - Inverno: área mantida sob pousio, com o desenvolvimento de vegetação espontânea. Uso agrícola sob pastejo extensivo com bovinocultura de corte de baixa carga animal¹ - Preparo do solo: revolvimento (aração + duas gradagens) a cada 4 anos, antecedente ao cultivo do arroz irrigado
ILP: Sistema de Integração Lavoura - Pecuária	<ul style="list-style-type: none"> - Verão: sequência de rotação de culturas sob sistema plantio direto: soja – gramínea de verão (milho/capim-sudão); - Inverno: semeadura com sobressemeadura de azevém. Pastejo intensivo com bovinocultura de corte de média a alta carga animal². - Preparo do solo: após o preparo do solo para a implantação, de camalhões de base larga, a área foi mantida sob sistema plantio direto, sem revolvimento do solo por mais de 10 anos. Dessecação da vegetação presente, previamente à semeadura da cultura de verão. - Pecuária: pastejo intensivo com bovinocultura de corte.
ASAS: Rotação de culturas arroz-soja-arroz-soja	<ul style="list-style-type: none"> - Verão: cultivo de arroz irrigado sob preparo convencional do solo; cultivo de soja sob semeadura direta. - Inverno: sobressemeadura natural de azevém e plantas espontâneas. - Preparo do solo: revolvimento anual, com preparo antecipado (outono); dessecação da vegetação espontânea presente, previamente à semeadura direta da soja; uso de macro e micro drenagem.

AASS: Rotação de culturas arroz-arroz-soja-soja	<ul style="list-style-type: none">- Verão: cultivo de arroz irrigado sob pregaro convencional do solo; cultivo de soja sob semeadura direta.- Inverno: sobressemeadura natural de azevém e plantas espontâneas.- Preparo do solo: revolvimento bianual (dois anos sim, dois anos não), com pregaro antecipado (outono); dessecação da vegetação espontânea presente, previamente à semeadura direta da soja; uso de macro e micro drenagem.
---	---

¹Baixa carga animal: carga animal ajustada para manter disponível sobre o solo uma quantidade de forragem de 24 kg de massa seca para cada 100 kg de peso de animal vivo por dia, que corresponde a aproximadamente 2 UA.

²Alta carga animal: carga animal ajustada para manter disponível sobre o solo uma quantidade de forragem de 12 kg de massa seca para cada 100 kg de peso de animal vivo por dia, que corresponde a aproximadamente 4 UA. A média carga animal corresponde ao ponto central entre alta e baixa carga animal (Theisen 2017).

Fonte: Os autores, 2024.

Em cada uma das áreas realizou-se a abertura de quatro mini trincheiras, em locais representativos e de forma aleatória, para a amostragem do solo. As amostras foram coletadas nas camadas 0,0 - 0,05 m, 0,05 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m em relação à superfície, para determinação da densidade, macro e microporosidade, porosidade total, estabilidade de agregados e curva de retenção de água em cada um dos sistemas integrados (SI). Para a avaliação da densidade, porosidade e curva de retenção de água, coletaram-se amostras de solo em triplicata com o auxílio de anéis volumétricos (0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura), totalizando 36 amostras por SI (3 amostras x 3 camadas x 4 trincheiras). Para determinação da estabilidade de agregados em laboratório, foi coletada uma amostra de monólito de solo com uma pá de corte, totalizando 12 amostras por SI (1 amostra x 3 camadas x 4 mini trincheiras), avaliadas em triplicata.

Para as determinações dos estoques de carbono orgânico total, as amostras de solo foram coletadas em duplicata com uma pá de corte, totalizando 12 amostras por SI (1 amostra x 3 camadas x 4 mini trincheiras), avaliadas em duplicata.

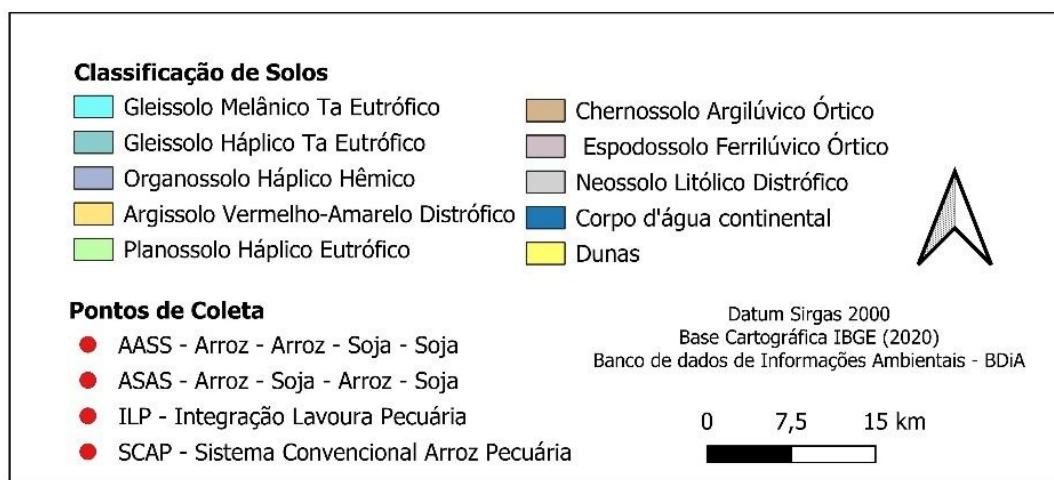
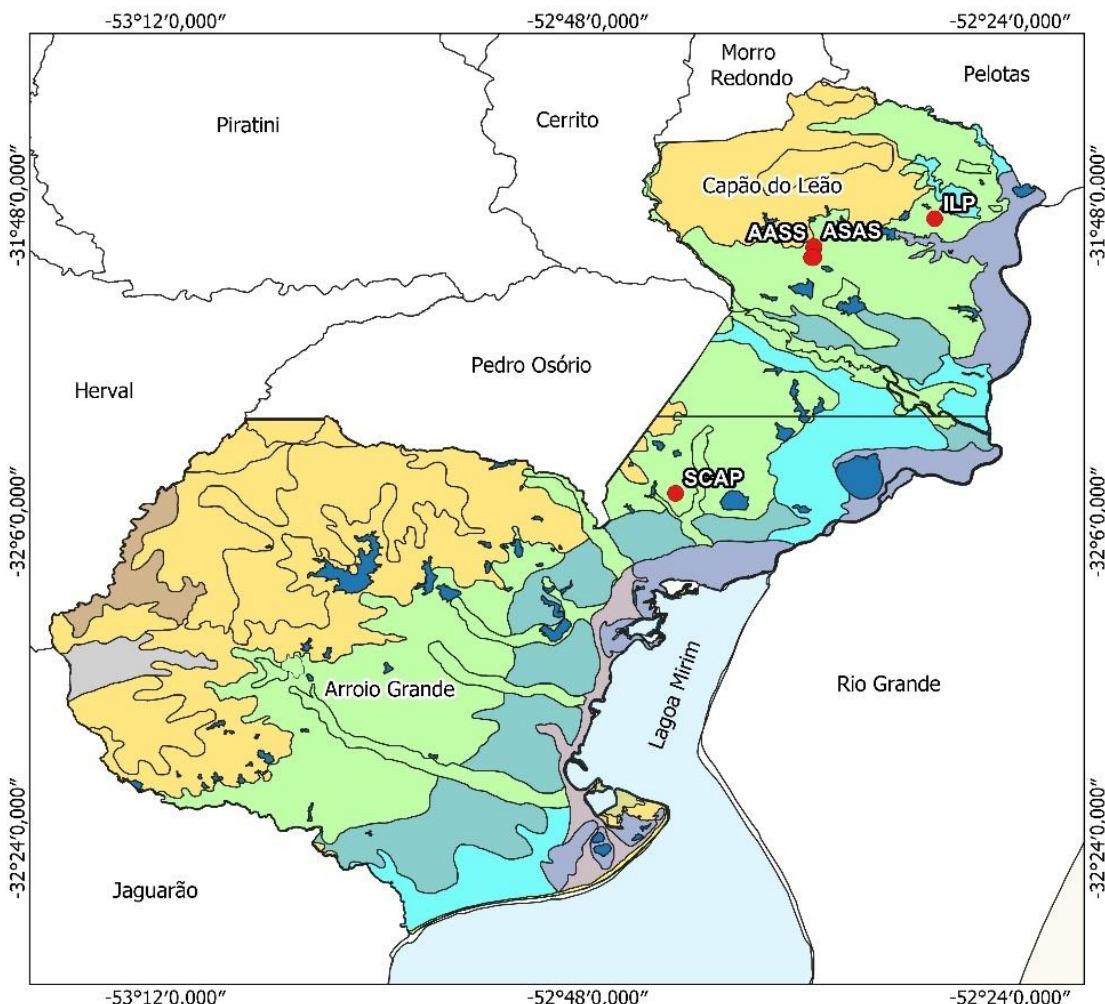
As amostras com estrutura preservada foram preparadas conforme Teixeira *et al.* (2017). Após o pregaro, foram saturadas por capilaridade durante 24 horas e colocadas em uma mesa de tensão, equilibradas a um potencial de -6 kPa para determinação da macroporosidade. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105°C até a obtenção de massa constante para determinação da microporosidade e da densidade do solo. A porosidade total foi calculada a partir da soma da macro e da microporosidade.

Para a determinação das curvas de retenção de água (CRA), foram utilizadas a mesa de tensão para equilíbrio do conteúdo de água das amostras de solo a -1 kPa e -6 kPa e as câmaras de pressão de Richards (Klute, 1986) a -10, -33, -102 e -1530 kPa. Com o ajuste dos dados experimentais da CRA pelo modelo de van Genuchten (1980), realizou-se o cálculo da água disponível (AD), que compreende a diferença dos valores estimados do conteúdo de água volumétrica no solo, em equilíbrio aos potenciais equivalentes à capacidade de campo (-10 kPa) e o ponto de murcha permanente (-1500 kPa).

As amostras de solo de estrutura não preservada foram expostas ao ar e à sombra até atingirem a umidade de friabilidade. Em seguida, foram cuidadosamente destorreadas manualmente, observando-se os pontos de fraqueza dos agregados, então secas ao ar e peneiradas a 9,52 mm (Yoder, 1936). Cada amostra foi dividida em quatro partes: uma para a determinação da umidade e as demais como repetições laboratoriais na determinação da distribuição dos agregados por classes de tamanho em via úmida, utilizando o aparelho de oscilação vertical. O peneiramento úmido foi realizado utilizando peneiras com aberturas de malha de 4,76; 2,0; 1,0; 0,25 e 0,105 mm, e a agitação durou 10 minutos, na frequência de 30 oscilações/min. O solo retido foi transferido para cápsulas de alumínio com jatos de água dirigidos ao fundo da peneira e, em seguida, colocado na estufa para secagem e pesado. Após a pesagem, adicionou-se solução de hidróxido de sódio (0,1 N NaOH) e homogeneizou-se para a determinação e exclusão de material inerte, conforme detalhado em Teixeira *et al.*, (2017) e Palmeira *et al.* (1999). A avaliação correspondeu aos intervalos de classes (C) de tamanho de agregados de: C1: 9,52 - 4,76 mm; C2: 4,75 - 2,0 mm; C3: 1,99 - 1,00 mm; C4: 0,99 - 0,25 mm; C5: 0,24 - 0,105 mm

e C6: <0,105 mm. A partir dessas classes, os agregados foram separados em macroagregados (maiores ou iguais a 0,25 mm) e microagregados (menores que 0,25 mm), de acordo com Tisdall e Oades (1982).

Figura 1 - Pontos de coleta dos quatro diferentes sistemas integrados e o seu tipo de solo



Fonte: Os autores, 2024.

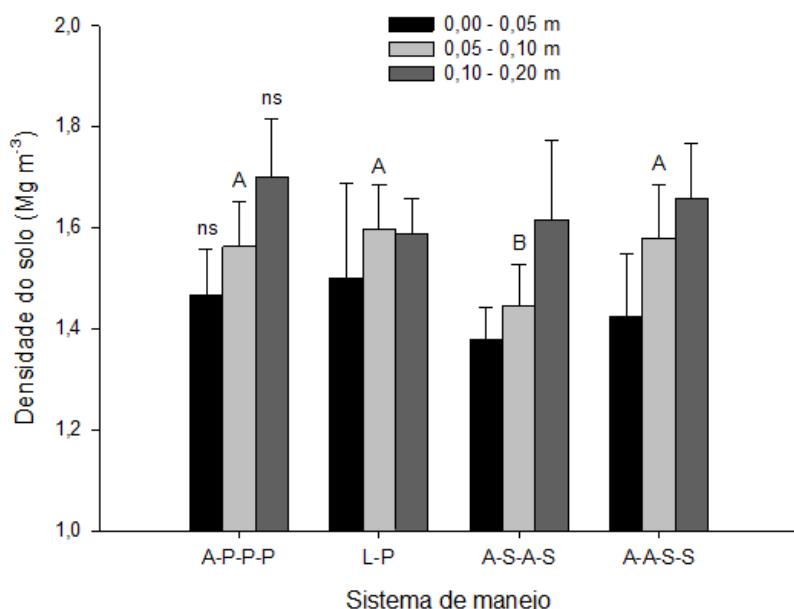
A quantificação dos teores totais de C foi realizada via combustão úmida pelo método de Walkley-Black (Tedesco *et al.*, 1995). As amostras foram secas ao ar, peneiradas a 2 mm e maceradas. Utilizou-se 1 g de solo seco, ao qual foram adicionados 10 mL de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$), seguido da adição lenta de 20 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), para promover a oxidação do carbono orgânico. Após repouso de 10 minutos, adicionaram-se 100 mL de água destilada e três gotas da solução do complexo o-fenantrolina-sulfato ferroso ($0,025\text{ mol L}^{-1}$). A titulação foi realizada com solução de sulfato ferroso até a mudança de coloração de verde para marrom. O teor de carbono orgânico foi calculado com base na diferença entre o dicromato adicionado e o consumido na reação. Para evitar interpretações equivocadas dos resultados, devido à influência do manejo na densidade do solo, os estoques de C foram calculados e expressos em termos de massa equivalente, utilizando-se a fórmula matemática de Sisti *et al.* (2004). O estoque de C foi obtido a partir dos resultados de C total, densidade e espessura de cada camada de solo.

Os dados brutos de cada atributo foram verificados quanto à presença de valores discrepantes mediante a análise de boxplots. Em seguida, os dados de cada variável foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando houve efeito significativo, realizou-se o teste de comparações de médias de Tukey (5% de probabilidade de erro) por meio do software Winstat (Machado; Conceição, 2002).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com exceção do conteúdo de água disponível no solo, todos os demais atributos do solo avaliados neste estudo foram influenciados significativamente pelos sistemas integrados de cultivo. Considerando a densidade do solo, na camada superficial (0,00 m a 0,05 m) e na camada de 0,10 a 0,20 m, não houve efeitos significativos (Figura 2); porém, na camada intermediária de 0,05 m a 0,10 m, a densidade foi significativamente inferior na sucessão arroz-soja-arroz-soja, a qual se destacou positivamente em relação aos demais sistemas. A menor densidade do solo observada na camada entre 0,05 m e 0,10 m no sistema arroz-soja-arroz-soja pode estar relacionada à maior frequência de revolvimento do solo, visto que a prática anual de revolvimento rompe as camadas que poderiam estar nos estágios iniciais de compactação. Considera que, em todos os SI, o solo apresentou altos valores de densidade (1,38 a 1,70 $Mg\text{ m}^{-3}$), o que reflete as características naturais de Planossolos encontrados em terras baixas do Sul do Brasil (Bamberg *et al.*, 2009).

Figura 2 - Densidade do solo nos diferentes sistemas integrados de produção agrícola (A-A-S-S: Arroz-arroz-soja-soja; A-P-P-P: Arroz-pousio-pousio-pousio; L-P: Lavoura-Pecuária; A-S-A-S: Arroz-soja-arroz-soja) sob diferentes camadas (0,00 – 0,05 m / 0,05-0,10m / 0,10 – 0,20m). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

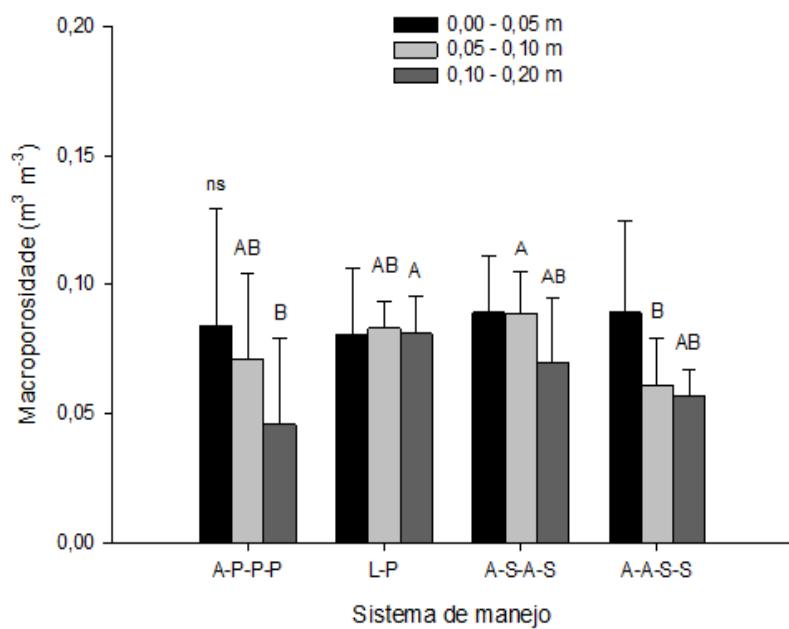


Fonte: Os autores, 2024.

Em relação à macroporosidade, na camada de 0,00 a 0,05 m, o comportamento dos resultados obtidos foi semelhante ao da densidade, ou seja, não foi indicada diferença significativa (Figura 3). Valores mais elevados de densidade estão relacionados à menor macroporosidade do solo. Parfitt, Pinto e Timm (2014), avaliando a sistematização em áreas de terras baixas no RS, constataram diminuição da porosidade total e da macroporosidade na camada de 0,00 - 0,20 m, com o consequente aumento da densidade, devido ao intenso tráfego de máquinas e do revolvimento frequente ao longo dos anos. Solos de terras baixas utilizados para fins agrícolas tendem a apresentar valores naturalmente baixos de macroporosidade e valores altos de densidade do solo. Nas áreas manejadas com revolvimento anual associado à incidência de elevada carga animal, esse comportamento pode ser agravado (Fulaneti *et al.*, 2018). Por outro lado, Sistemas Integrados que limitam a carga animal ou não envolvem pisoteio animal, com o tráfego limitado de máquinas agrícolas, bem como a utilização frequente de cultivos cujas plantas possuam sistemas radiculares densos, como o azevém, podem mitigar a compactação do solo em terras baixas.

Destacam-se, na camada intermediária, os menores valores de macroporosidade e maiores de densidade apresentados no sistema arroz-arroz-soja-soja, em relação ao sistema arroz-soja-arroz-soja, provavelmente pelo revolvimento superficial realizado a cada ano, em relação ao revolvimento bianual realizado no sistema arroz-arroz-soja-soja, corroborando com Parfitt *et al.* (2009), que observaram a mesma relação entre esses dois atributos. Na camada de 0,10 m a 0,20 m, os valores médios de macroporosidade apresentados pelo sistema arroz-pousio-pousio-pousio foram significativamente inferiores aos apresentados pelo sistema integração lavoura-pecuária, demonstrando que, provavelmente, a baixa taxa anual de adição de material orgânico em maior profundidade proporcionado pelo sistema arroz-pousio-pousio-pousio tenha influenciado esses valores.

Figura 3 - Macroporosidade de um Planossolo nos diferentes sistemas integrados de produção agrícola (A-A-S-S: Arroz-arroz-soja-soja; A-P-P-P: Arroz-pousio-pousio-pousio; L-P: Lavoura-Pecuária; A-S-A-S: Arroz-soja-arroz-soja) sob diferentes camadas (0,00 – 0,05 m 0,05-0,10m / 0,10 – 0,20m). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

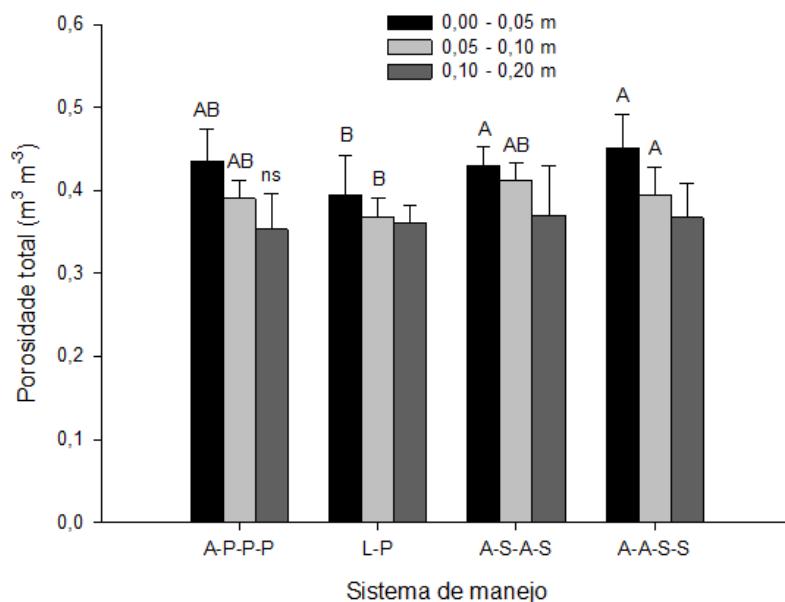


Fonte: Os autores, 2024.

Analisando a porosidade total (Figura 4), destaca-se os maiores valores médios apresentados nas sucessões arroz-soja-arroz-soja e arroz-arroz-soja-soja, na camada mais superficial (0,00 m a 0,05 m), em relação ao sistema lavoura-pecuária. Na camada intermediária, o sistema arroz-arroz-soja-soja foi superior ao sistema lavoura-pecuária. Na camada de 0,10 a 0,20 m, os resultados obtidos para os

sistemas integrados demonstraram similaridade, não apresentando diferenças significativas (Figura 4). Em relação à porosidade total, Da Silva *et al.* (2021), comparando a rotação de arroz e soja conduzida em sistema plantio direto com a mesma rotação sob sistema sulco-camalhão em preparo convencional em terras baixas, também evidenciaram maior porosidade sob preparo convencional. Denota-se que os solos de terras baixas são altamente propensos à perda de porosidade e, por isso, tem sido difícil a consolidação de sistemas de cultivo que preconizam o revolvimento mínimo do solo nesse ecossistema.

Figura 4 - Porosidade total de um Planossolo do solo nos diferentes sistemas integrados de produção agrícola (A-A-S-S: Arroz-arroz-soja-soja; A-P-P-P: Arroz-pousio-pousio-pousio; L-P: Lavoura-Pecuária; A-S-A-S: Arroz-soja-arroz-soja) sob diferentes camadas (0,00 - 0,05 m, 0,05 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



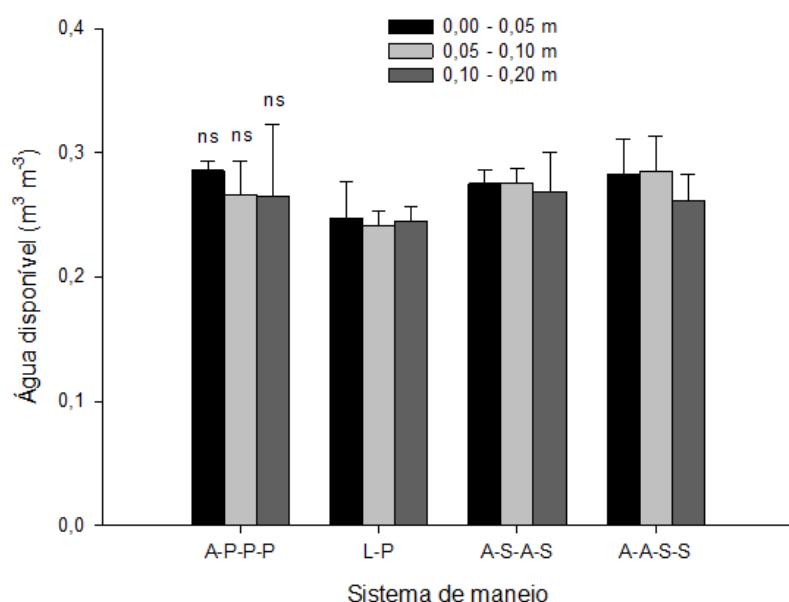
Fonte: Os autores, 2024.

Ao analisar os sistemas de cultivo e camadas, observa-se que a quantidade de água disponível (Figura 5) não apresentou diferença significativa entre os sistemas integrados de manejo, nas camadas avaliadas, assim como a maior parte dos demais atributos físicos.

Em relação aos estoques de carbono orgânico no solo (Figura 6), observa-se que, na camada superficial, o sistema Lavoura-Pecuária apresentou menor estoque de carbono que os sistemas Arroz-pousio-pousio-pousio e Arroz-soja-arroz-soja. Na camada 0,05 - 0,10 m, não se observaram diferenças significativas nos estoques de carbono entre os manejos. Na camada superficial, o menor estoque no sistema Lavoura-Pecuária, quando comparado com os demais sistemas avaliados, está provavelmente associado ao uso de pastejo de alta intensidade e elevada carga animal.

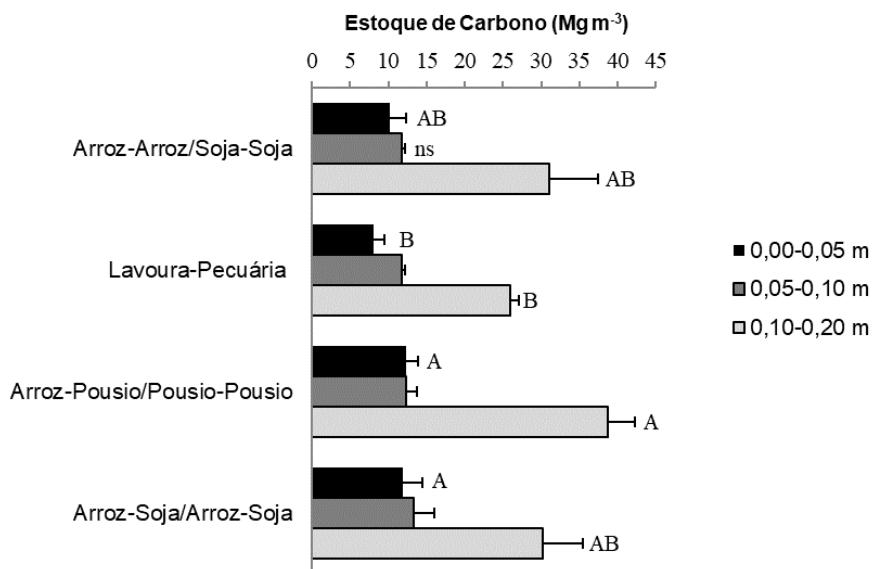
Ribeiro *et al.* (2019), ao avaliarem a adição de carbono em sistema de integração lavoura-pecuária submetido a diferentes intensidades de pastejo (aveia preta - *Avena strigosa* Schreb.) e adubação nitrogenada, constataram que houve redução nos incrementos de C quando comparado ao pastejo a 0,07 m com 0,15 m (altura média da pastagem remanescente), em função da quantidade de resíduos vegetais remanescentes. De Souza *et al.* (2009), avaliando os estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema integrado Lavoura-Pecuária, também observaram redução nos estoques destes dois elementos a partir do terceiro ano de implementação do sistema, em pastejo de alta intensidade (0,10 m de altura da pastagem remanescente) como critério de retirada dos animais. Dessa forma, em sistemas integrados que empregam a pecuária, fica evidente que o nível de pisoteio animal e a quantidade de material orgânico remanescente na área são fatores essenciais para o controle dos processos de degradação física de solos de terras baixas.

Figura 5 - Água disponível às plantas de um Planossolo nos diferentes sistemas integrados de produção agrícola (A-A-S-S: Arroz-arroz-soja-soja; A-P-P-P: Arroz-pousio-pousio-pousio; L-P: Lavoura-Pecuária; A-S-A-S: Arroz-soja-arroz-soja) sob diferentes camadas (0,00 - 0,05 m, 0,05 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade



Fonte: Os autores, 2024.

Figura 6 - Estoque de carbono de um Planossolo nos diferentes sistemas de produção e camadas (0,00 – 0,05 m / 0,05-0,10 m / 0,10 – 0,20 m). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade



Fonte: Os autores, 2024.

Observa-se, pelos agregados estáveis em água (Tabela 2), que o sistema Lavoura-Pecuária apresentou uma menor porcentagem de macroagregados (13,92%) na camada de 0,00 a 0,05 m em relação aos sistemas Arroz-Arroz-soja-soja (23,71%) e Arroz-soja-arroz-soja (20,69%), sendo equivalente ao sistema Arroz-pousio-pousio-pousio (14,93%). Nas demais camadas, os SI não

influenciaram de forma significativa as quantidades médias de micro e de macroagregados do solo, de acordo com o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 2). De acordo com Tavares Filho *et al.* (2012), a formação e estabilização de agregados estáveis, bem como a distribuição hierárquica entre as diferentes classes de tamanhos, são fortemente influenciadas pelo manejo. E especificamente, de acordo com Tisdall e Oades (1982) e Bamberg *et al.* (2009), esses processos estão intimamente relacionados aos teores e aportes anuais de C, à atividade de sistemas radiculares, da fauna do solo e à ação de agentes ligantes inorgânicos no solo.

Tabela 2 - Porcentagem de agregados estáveis em água de um Planossolo, nas diferentes classes de tamanho, em sistemas integrados de produção agrícola e camadas (0,0 – 0,05 m, 0,05 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m)

Agregados estáveis em água (%)	Arroz-Arroz/ Soja-Soja	Lavoura- Pecuária	Arroz-Pousio/ Pousio-Pousio	Arroz-Soja/ Arroz-Soja
0,00 – 0,05 m				
Classes de tamanho (mm)				
C1 (9,52 – 4,76 mm)	1,56	0,92	0,04	0,30
C2 (4,76 -2,00 mm)	3,41	2,01	1,44	2,08
C3 (2,00 – 1,00 mm)	3,39	2,18	1,98	3,05
C4 (1,00 – 0,50 mm)	15,36	8,82	11,46	15,26
C5 (0,50 – 0,105mm)	4,12	4,55	3,50	2,82
C6 (< 0,105mm)	72,16	81,54	81,57	76,49
Macroagregados	23,71 A	13,92 B	14,93 AB	20,69 A
Microagregados	76,29 B	86,08 A	85,07 A	79,31 AB
DMP	0,43 A	0,27 AB	0,20 B	0,28 AB
0,05 – 0,10 m				
C1 (9,52-4,76 mm)	1,01	1,59	0,64	0,08
C2 (4,76 -2,00 mm)	2,39	3,60	2,49	1,01
C3 (2,00 – 1,00 mm)	2,79	4,34	3,00	2,09
C4 (1,00 – 0,50 mm)	19,32	16,18	17,56	18,27
C5 (0,50 – 0,105 mm)	3,30	5,53	4,13	5,67
C6 (< 0,105 mm)	71,19	68,76	72,19	72,88
Macroagregados	25,51^{ns}	25,72	23,68	21,45
Microagregados	74,49^{ns}	74,28	76,32	78,55
DMP	0,32^{ns}	0,45	0,32	0,24
0,10-0,20 m				
C1 (9,52-4,76 mm)	0,03	1,58	6,29	0,55
C2 (4,76 -2,00 mm)	0,45	3,25	4,56	1,01
C3 (2,00 – 1,00 mm)	0,62	3,91	3,42	2,30
C4 (1,00 – 0,50 mm)	18,44	24,24	19,60	22,15
C5 (0,50 – 0,105mm)	9,06	6,20	5,49	4,54
C6 (< 0,105mm)	71,39	60,82	60,64	69,45
Macroagregados	19,55^{ns}	32,98	33,87	26,00
Microagregados	80,45^{ns}	67,02	66,13	74,00
DMP	0,20^{ns}	0,48	0,82	0,25

Fonte: Os autores, 2024.

O aumento da estabilidade de agregados em superfície está intimamente relacionado com os teores e aportes anuais de carbono orgânico e com revolvimento, que transforma os macroagregados em microagregados (Devine *et al.*, 2014). Pode-se observar que, nos sistemas em que ocorre o preparo anual, há menor concentração de macroagregados estáveis. Outro fator que pode ter influenciado a quantidade de macroagregados foi a intensidade de pastejo de bovinos. O sistema Lavoura-pecuária foi manejado com bovinocultura de corte de alta carga animal, enquanto o sistema Arroz-Pousio-Pousio-Pousio operou sob um pastejo extensivo com bovinocultura de corte com menor carga animal. Conforme Conte *et al.* (2011), o pisoteio animal influencia os atributos físicos, principalmente na camada superficial do solo. Já Salomão *et al.* (2020) ressaltam que o sistema plantio direto tem influência no conteúdo de carbono orgânico e que, quando integrado por plantas de cobertura e rotação

de culturas, apresenta melhor aporte de resíduos orgânicos, tornando-se mais eficiente para o acúmulo e manutenção da matéria orgânica, favorecendo, dessa forma, a agregação e a estrutura do solo.

De modo geral, os resultados apresentados pelos atributos avaliados evidenciam que, além do manejo adotado em cada sistema integrado de produção, o tipo de solo (Planossolo) exerce papel muito importante sobre os atributos físicos do solo. Condições naturalmente desfavoráveis ao cultivo de culturas de sequeiro – como baixa condutividade hidráulica saturada, relação macro/microporos e elevada densidade, entre outros – tornam os solos de terras baixas muito resistentes aos efeitos dos sistemas de manejo sobre as melhorias da qualidade física. Sendo assim, são necessários vários anos consecutivos de adoção de boas práticas agrícolas para que se manifestem e se detectem alterações benéficas associadas aos tipos de solos encontrados nesse tipo de ecossistema.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou o efeito sobre a qualidade física do solo decorrente da utilização de quatro Sistemas Integrados (SI) de produção agrícola nas terras baixas do Sul do Brasil. Ele representa um agroecossistema com parte relevante das áreas cultivadas com culturas anuais e pecuária de corte da porção brasileira do Bioma Pampa. Com exceção do sistema Lavoura-Pecuária, conduzido sob camalhões de base larga e elevada carga animal, e que apresentou condições físicas mais restritivas, os demais SI se mostraram relativamente similares entre si quando considerada a densidade, a macro e a microporosidade do solo.

A introdução da cultura da soja (Arroz-soja-arroz-soja - ASAS e Arroz-arroz-soja-soja - AASS), bem como as práticas de manejo associadas a essa cultura, promoveram benefícios perceptíveis ao solo (ASAS com menor densidade na camada 0,05 – 0,10 m; ASAS e AASS com maior proporção de macroagregados estáveis na camada 0,00 – 0,05 m). Evidencia-se que o SI Pousio em três anos consecutivos (Arroz-Pousio-Pousio-Pousio) não se mostrou vantajoso do ponto de vista da qualidade física, hídrica e de estoques de carbono do solo.

Dentre os sistemas integrados avaliados, considera-se que a qualidade de solos em terras baixas pode ser melhorada pela adoção de rotação de arroz com culturas anuais como a soja. Por outro lado, a pecuária com elevada carga animal e de alta intensidade de pastejo, bem como o pousio prolongado, ao promoverem baixa taxa anual de adição de resíduos orgânicos no solo, devem ser evitados. Estudos ainda são necessários para elucidar dúvidas considerando a integração e a implementação de diversos sistemas nessas áreas agrícolas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado, ao Programa de Pós-graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água (MACSA); aos Laboratórios do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel e à Embrapa Clima Temperado pelo apoio financeiro, de pessoal e de infraestrutura; e aos produtores rurais Genadio Lima da Costa e Everci Lobato, pela concessão de acesso às áreas abrangidas para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, D. T.; CLEMENTE, L.F. S.; CARNEIRO, R. C.; LANDIM, M. V. G.; MOURA, G. F. Integração lavoura pecuária (ILP): uma breve revisão de literatura. *Scientia Generalis*, v. 2, n. Supl. 1, p. 141-141, 2021. Disponível em: <https://scientiageneralis.com.br/index.php/SG/article/view/358>. Acesso em: 22 out. 2024.
- BAMBERG, A. L.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S.; TIMM, L. C.; PINTO, L. F. S.; DE LIMA, A. C. R.; DA SILVA, T. R. Densidade de um Planossolo sob sistemas de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, n. 5, p. 1079-1086, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500001>.
- CASSOL, G. V.; MARCHESAN, E.; MASSEY, J. H.; ROBAINA, A. D.; TRIVISOL, V. S.; WERLE, I.; GOLLO, E. de A.; GIACOMELI, R.; SCHMATZ, R. Raised seedbeds and irrigation increase the yield

of soybean rotated with rice in lowland of Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, e01398, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921>.

CONTE, O.; WESP, C. de L.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. de F.; LEVIEN, R. NABINGER, C. 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**, v. 35, n. 2, p. 579-587, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200027>.

CORREIA, S. D. L.; SILVA, P. R. F. D.; SERPA, M. D. S.; VIEIRA, V. M.; BOENI, M.; MENEZES, G. B. Estratégias de manejo da palha de azevém para cultivo do arroz irrigado em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 512- 520, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000200022>.

DA SILVA, P. R. F.; MARCHESAN, E.; SCHOENFELD, R. Rotação e sucessão de culturas. In: EMYGDIO, B. M.; DA ROSA, A. P. S. A.; DE OLIVEIRA, A. C. B. **Cultivo de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: <http://livimagens.sct.embrapa.br/amostras/00085380.pdf>. Acesso em: 22 out. 2024.

DA SILVA, L. B. X.; VIEIRA, P. A.; CAMPOS, A. D.; VEIGA, A. B.; SINNEMANN, C. S.; CONCENÇO, G.; PARFITT, J. M. Efeito da época de preparo do camalhão no desenvolvimento de plantas de soja em terras baixas. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 18913-18921, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-505>.

DE SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. D. A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. D. F.; ANDRIGUETI, M.; CAO, E. 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**, v. 33, n. 6, p. 1829-1836, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600031>.

DEVINE, S.; MARKEWITZ, D.; HENDRIX, P.; COLEMAN, D. Soil aggregates and associated organic matter under conventional tillage, no-tillage, and forest succession after three decades. **PLoS one**, v. 9, n. 1, p. e84988, 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084988>.

FULANETI, F. NETO, E. S. B.; PINHEIRO, R. T.; FIPKE, G. M.; AMADOR, E. C. M.; GIACOMELI, R. Propriedades físicas do solo e sistemas de irrigação em terras baixas. In: SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 10., 2018, Santana do Livramento -RS. **Anais [...] Santana do Livramento: UNIPAMPA, 2018.** p. 1-5. Disponível em: https://guri.unipampa.edu.br/uploads/evt/arq_trabalhos/17651/seer_17651.pdf. Acesso em: 22 out. 2024.

HIRAKURI, M. H.; PRANDO, A. M.; OLIVEIRA, A. B.; CONCENÇO, G. Análise de viabilidade econômicofinanceira da rotação arroz-soja, com o sistema sulco-camalhão, em terras baixas do Rio Grande do Sul. **Embrapa Soja**, 2021. Londrina: Embrapa Soja. 14 p., 2021. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/224235/1/Circ-Tec-171.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2024.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (ed). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: **American Society of Agronomy**, p. 635-660, 1986. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>.

MACHADO, A. de A.; CONCEIÇÃO, A. R. **WinStat**: sistema de análise estatística para Windows. Versão 2.0. Pelotas: UFPEL/NIA. 2002

MELO, T. S.; VEIGA; A. B., SINNEMANN, C. S.; SILVA, L. B. X., VIEIRA, P. A.; CONCENÇO, G.; PARFITT, J. M. B. Efeito do sistema de cultivo e manejo do solo no estabelecimento de soja em terras baixas. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n.2, p. 18905-18912, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-504>.

PALMEIRA, P. R. T.; PAULETTO, E. A.; TEIXEIRA, C. F. A.; GOMES, A. D. S.; SILVA, J. D. Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p.189-195. 1999. <https://doi.org/10.1590/S0100-0683199000200001>.

PARFITT, J. M. B.; TIMM, L. C.; PAULETTO, E. A.; SOUSA, R. O. D.; CASTILHOS, D. D.; ÁVILA, C. L. D.; RECKZIEGEL, N. L. Spatial variability of the chemical, physical and biological attributes in

lowland cultivated with irrigated rice. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** (Impresso), v. 33, n. 4, p. 819-830, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400007>.

PARFITT, J. M. B; PINTO, M. A. B; TIMM, L. C. Efeito da sistematização sobre atributos físicos, químicos e biológicos de um solo de várzea no Rio Grande do Sul. **Embrapa Clima Temperado**, Pelotas – RS. 2014. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/998984/1/Boletim189web.pdf>. Acesso em: 22 out. 2024.

PARFITT, J.; WINKLER, A.; da SILVA, J. T.; PINTO, M.; TIMM, P. Manejo da água no cultivo da soja em rotação com arroz irrigado em área não sistematizada. Documentos, **Embrapa Clima Temperado**, 2017. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. 120 p., 2015. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1082612/1/Documentos440.pdf>. Acesso em: 22 out. 2024.

RIBEIRO, P. L; BAMBERG, A. L.; REIS, D. A; OLIVEIRA, A. C. B. Condições físico-hídricas de Planossolo cultivado com soja em plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n.9, p. 1484-1491, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900047>.

RIBEIRO, R. H.; BRATTI, F.; LOCATELLI, J. L.; PIVA, J. T.; DIECKOW, J. Adição de carbono em sistema de integração lavoura-pecuária submetido à intensidades de pastejo e nitrogênio. **VI Reunião Paranaense de Ciência do Solo**. 2019. Disponível em: https://rpcs2019.com.br/trabalhos_aprovados/arquivos/04082019_140418_5cab834a217cd.pdf. Acesso em: 22 out. 2024.

ROSSO, R. B.; PEITER, M. X., ROBAINA; A. D., TORRES; R. R., & KIRCHNER; J. H. Uso de camalhões de base larga para a viabilização do cultivo de soja em terras baixas. **IRRIGA**, v. 23, n. 4, p. 679-696, 2018. <https://doi.org/10.15809/irriga.2018v23n4p679-696>.

SALES, A.; SILVA, A. R.; VELOSO, C. A. C.; CARVALHO, E. J. M.; MIRANDA; B. M. Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na Amazônia Legal. **Colloquium Agrariae**, v. 14, n. 1, p. 01-15, 2018. <https://doi.org/10.5747/ca.2018.v14.n1.a185>.

SALOMÃO, P. E. A.; KRIEBEL, W.; DOS SANTOS, A. A.; MARTINS, A. C. E. A importância do sistema de plantio direto na palha para reestruturação do solo e restauração da matéria orgânica. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 1, 2020. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i1.1870>.

SCIVITTARO, W. B.; SILVEIRA, A. D.; ANDRES, A.; FARIA, M. D. O.; JARDIM, T. M.; DE SOUSA, R. O.; BAYER, C. Mitigação de emissões de gases de efeito estufa em terras baixas pela inserção de cultivos de sequeiro em rotação ao arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 10., 2017, Embrapa Clima Temperado. **Anais [...]**. Gramado: Sosbai, 2017. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1075136/1/WalkyriaW.B.Scivittaro1.pdf>. Acesso em: 22 out. 2024.

SISTI, C.P.J.; SANTOS, H.P.; KOHHAN, R.; ALBES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODEY, R.M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.76, p.39-58, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.08.007>.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P. D.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Integração lavoura e pecuária e os atributos físicos de solo manejado sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 129-136, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100014>.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; Klamt, E.; NASCIMENTO, GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER. 2018, 254 p. Disponível em: <https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/solos/livros/SOLOS%203%20EDICAO.pdf>. Acesso em: 22 out. 2024.

TAVARES FILHO, J.; FELTRAN, C. T. M.; OLIVEIRA, J. F. D.; ALMEIDA, E. D; GUIMARÃES, M. D. F. Atributos de solo determinantes para a estimativa do índice de estabilidade de agregados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 436-441, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000300016>.

TEDESCO J. M.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEM, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solos, plantas e outros materiais**. 2 ed. Porto Alegre: Depto de Solos, UFRGS, 1995. Disponível em: https://rolas.cnpt.embrapa.br/arquivos/manual_rolas.pdf. Acesso em: 22 out. 2024.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1107368/1/Pt5Cap1Micromorfologiados_olo.pdf. Acesso em: 23 de out. 2024.

THEISEN, G. **A comprehensive assessment of agriculture in lowlands of south Brazil: characterization and comparison of current and alternative concepts**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Wageningen: Wageningen University & Research. 2017. <https://doi.org/10.18174/419841>

TIMM, P. A.; DE CAMPOS, A. D. S.; BUENO, M. V.; AIRES, T.; DA SILVA, J. T.; SCHREIBER, F.; TIMM, L. C. Avaliação de cultivares de soja produzida em sistema camalhão em terras baixas. In: CONGRESSO DO ARROZ IRRIGADO, 10., Gramado– RS. **Anais [...]**. Gramado: Sosbai, 2017, p. 1-4. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1075766/1/WalkyriaResumoCBAIPamela3.pdf>. Acesso em: 22 out. 2024.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of soil science**, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.

YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **J. Am. Soc. Agron.**, 28:337-351,1936.

<https://doi.org/10.2134/agronj1936.00021962002800050001x>.

Recebido em: 29/11/2024

Aceito para publicação em: 09/06/2025