

HALF WEINBERG CORRÊA JORDÃO

**QUALIDADE DO SOLO EM UM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO
AGROPECUÁRIA COM PASTEJO POR OVINOS**

**Botucatu
2022**

HALF WEINBERG CORRÊA JORDÃO

**QUALIDADE DO SOLO EM UM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO
AGROPECUÁRIA COM PASTEJO POR OVINOS**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Doutor em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Dr. Juliano Carlos Calonego

Coorientadora: Dr^a Nídia Raquel Costa

**Botucatu
2022**

J82q	Jordão, Half Weinberg Corrêa Qualidade do solo em um sistema integrado de produção agropecuária com pastejo por ovinos / Half Weinberg Corrêa Jordão. -- Botucatu, 2022 82 p. : il., tabs. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientador: Juliano Carlos Calonego Coorientadora: Nídia Raquel Costa 1. Saude do solo. 2. Carbono orgânico. 3. Glycine max. 4. Integração lavoura-pecuária. I. Título.
------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO DA TESE: QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA
PARA PASTEJO POR OVINOS**

AUTOR: HALF WEINBERG CORRÊA JORDÃO

ORIENTADOR: JULIANO CARLOS CALONEGO

COORIENTADORA: NÍDIA RAQUEL COSTA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA
(AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JULIANO CARLOS CALONEGO (Participação Virtual)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu UNESP

Prof. Dr. ANDRÉ MICHEL DE CASTILHOS (Participação Virtual)
Melhoramento e Nutrição Animal / FMVZ / UNESP - Botucatu/SP

Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO PORTUGAL (Participação Virtual)
Pós-Doutorando - Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu

Pesquisador Dr. WANDER LUÍS BARBOSA BORGES (Participação Virtual)
Centro de Seringueira e Sistemas Agroflorestais / Instituto Agrônomo de Campinas

Pesquisador Dr. CRISTIANO MAGALHÃES PARIZ (Participação Virtual)
/ Pariz Consultoria

Botucatu, 29 de julho de 2022

Ao meu pai José Maria
(em memória), minha mãe
 Maria do Carmo e meu
 avô Almir Corrêa,

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Deus por tudo que proporciona em minha vida.

Aos meus irmãos Walleson, Judiedson, Cristino e Bruna pelo apoio incondicional.

Ao Professor Dr. Juliano Carlos Calonego, pela boa orientação, ensinamentos e oportunidade que me deu de almejar o título de doutorado, sendo um profissional exemplo de respeito e companheirismo.

À minha Coorientadora Dr^a Nídia Raquel Costa, pelos ensinamentos, ajuda, amizade e companheirismo durante a condução desse estudo.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) e Departamento de produção Vegetal pela oportunidade de ingressar neste curso de Pós-Graduação.

À Fundação Agrisus (Agricultura Sustentável), pelo fomento concedido ao projeto.

Aos meus professores durante o curso de doutorado, pelo ensino, dedicação e estímulo à formação profissional.

Ao Dr. Cristiano Pariz, Prof. Dr. Ciniro Costa e Prof. Paulo Meirelles, pela parceria e disponibilidade da área experimental para a condução da pesquisa.

Ao Dr. Daniel Martins e Dr. Igor Cruz, pelo constante suporte na condução do experimento.

Aos estagiários do curso de Agronomia Yasmin, Maria Elisa, Júlio, Nelson, Lauro e Vinícius pela ajuda na condução do experimento.

Aos meus amigos, Ivanayra, Celismar, Anderson, Laudelino e Marcela, pelo apoio, colaboração e amizade.

Aos Técnicos do Laboratório de relação solo-planta, Iara, Vinícius, Dariele e Julia, pelo suporte nas análises de solo e planta.

Aos funcionários do Departamento de Produção Vegetal, Eliane, Casemiro e Ciro, e funcionários da FEPE, Dirceu e Flávio pela colaboração operacional na condução do experimento.

Aos amigos, Alessandro, João, Patrick, Matheus, Júlio e Douglas pelo suporte e bons momentos durante minha estadia em Botucatu.

Aos membros da banca, por aceitarem participar e contribuírem para a qualidade desta tese.

Aos demais amigos que tive oportunidade de conhecer durante o doutorado, que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para a conclusão desse trabalho. Desejo muito sucesso a todos, durante suas caminhadas.

O presente estudo foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

O uso de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) é uma alternativa viável para superar questões globais de segurança alimentar, mudanças climáticas, produção sustentável de alimentos e degradação do solo. A maior diversificação de espécies nos SIPAs pode apresentar efeito residual nos atributos químicos e físicos do solo, na ciclagem de nutrientes e na produtividade das culturas. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito residual de diferentes SIPAs, na qualidade dos atributos físicos e químicos do solo, produção de silagem e cobertura vegetal do solo. O experimento foi conduzido durante dois anos agrícolas (2018/19 e 2019/20), em área com histórico de dois sistemas de consórcios, na Fazenda Experimental Lageado, em área pertencente à Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia (FMVZ/UNESP) no município de Botucatu/SP, em um Latossolo Vermelho distrófico. Os dois históricos de consórcio avaliados consistiram no cultivo de milho em consórcio com capim-marandu e ao cultivo de milho consorciado com capim-marandu e feijão-guandu nas safras de 2013/14, 2014/15 e 2015/16. Os efeitos residuais desses consórcios foram avaliados no cultivo da cultura da soja para ensilagem de planta inteira em consórcio com capim-aruana, nas safras de verão (2018/19 e 2019/20). Foi coletado solo nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m para a determinação dos atributos físicos e químicos do solo, coletou-se também amostras de planta de soja e palhada para determinação da produtividade de palhada e silagem e teor nutricional. Os dados foram submetidos à análise de variância e comparados pelo teste t LSD ($p \leq 0,05$). Os SIPAs influenciaram na densidade e porosidade do solo, assim como nos teores de N, P, K, Ca, Mg e S no solo ao longo dos dois anos agrícolas. Houve influência também na produtividade de palhada e silagem, bem como no acúmulo de C e N na palhada em função dos SIPAs avaliados. Os SIPAs contribuíram para o aumento e manutenção de palhada sobre a superfície do solo, permitindo mínima alteração na agregação do solo.

Palavras-chave: saúde do solo; carbono orgânico; *Glycine max*; integração lavoura-pecuária

ABSTRACT

The use of Integrated Crop-Livestock Systems (ICLS) is a viable alternative to overcome global issues of food security, climate change, sustainable food production and soil degradation. Greater species diversification in the ICLSs can provide a residual effect on soil chemical and physical attributes, nutrient cycling, and crop yield. This research aimed to evaluate the residual effect of different ICLSs on the quality of physical and chemical soil attributes, silage yield and ground cover. The experiment was conducted during two agricultural years (2018/2019 and 2019/2020) in a Dystrophic Red Latosol with cultivation history of two ICLS, at Lageado Experimental Farm, belonging to the College of Veterinary Medicine and Animal Science (FMVZ/UNESP) - Botucatu / SP. The two ICLSs evaluated consisted of maize intercropped with palisade grass and maize intercropped with palisade grass and pigeon pea in the 2013/14, 2014/15 and 2015/16 growing seasons. The residual effects of these ICLSs were evaluated in the cultivation of soybean crop for whole-plant silage intercropped with guinea grass in the summer crops (2018/19 and 2019/20). Soil was collected in the layers 0.0-0.05, 0.05-0.1, 0.1-0.2 and 0.2-0.4 m for the determination of soil physical and chemical attributes, soybean plant and straw samples were also collected for the determination of straw and silage productivity and nutritional content. Data were subjected to analysis of variance and compared by LSD t test ($p \leq 0.05$). ICLSs influenced soil density and porosity, as well as soil N, P, K, Ca, Mg and S contents over the two agricultural Years. There was also an influence on the yield of straw and silage and on the accumulation of C and N in the straw as a function of the ICLSs evaluated. ICLSs contributed to the increase and maintenance of straw on the soil surface, allowing minimal change in soil aggregation.

Keywords: soil health; organic carbon; *Glycine max*; crop-livestock integration

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Precipitação e temperatura máxima e mínima durante a condução da pesquisa, no período de setembro de 2018 a março de 2020, Botucatu, SP	31
Figura 2 – Atributos físicos do solo avaliados nas camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, no primeiro e segundo ano de avaliação do experimento	45
Figura 3 – Atributos físicos do solo avaliados nas camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, em função dos históricos de consórcio de milho + braquiária (MB) e milho + braquiária + guandu (MBG)	47
Figura 4 – Atributos químicos do solo avaliados nas camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, no primeiro e segundo ano de avaliação do experimento	51
Figura 5 – Atributos químicos do solo avaliados nas camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, em função dos históricos de consórcio de milho + braquiária (MB) e milho + braquiária + guandu (MBG)	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise de variância, com os valores de p do teste F ($p \leq 0,05$), para os atributos físicos do solo, avaliados nas camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m	43
Tabela 2 – Desdobramento da interação ano x histórico de consórcio para a densidade do solo (kg dm^{-3}), nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m..	48
Tabela 3 – Análise de variância, com os valores de p do teste F ($p \leq 0,05$), para as propriedades químicas do solo, avaliadas nas camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m	50
Tabela 4 – Desdobramento da interação significativa ano x histórico de consórcio para as variáveis carbono orgânico (CO) nas camadas de 0,05-0,10 e 0,20-0,40 m, e fósforo (P) e enxofre (S) na camada de 0,10-0,20 m	55
Tabela 5 – Desdobramento da interação significativa ano x histórico de consórcio para as variáveis acidez potencial (H+Al) na camada de 0,20-0,40 m, soma de bases (SB) na camada de 0,10-20 m e saturação por bases (V) na camada de 0,20-0,40 m.....	57
Tabela 6 – Estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo e valores de P do teste F nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, em função do ano agrícola e histórico de consórcio em área cultivada com o consórcio de soja e capim-aruaana.....	59
Tabela 7 – Acúmulo de Carbono (C) e Nitrogênio (N), Relação C/N, Produtividade de palhada e valores de p do teste F, em função do ano agrícola e histórico de consórcio em área cultivada com o consórcio de soja e capim-aruaana em Botucatu, SP	61
Tabela 8 – Desdobramento da interação significativa ano agrícola x histórico de consórcio para o acúmulo de carbono (C) na palhada e produtividade de palhada, em área cultivada com o consórcio de soja e capim-aruaana em Botucatu, SP	62
Tabela 9 – Teor de Nitrogênio (N), Fósforo (P), Enxofre (S), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Potássio (K) nas folhas de soja, e valores de p do teste F em função do Ano agrícola e Histórico de consórcio em área cultivada com o consórcio de soja e capim-aruaana no município de Botucatu, SP	64

Tabela 10 – Teor de Nitrogênio (N), Fósforo (P), Enxofre (S), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Potássio (K) na palhada sob o solo, e valores de p do teste F em função do Ano agrícola e Histórico de consórcio em área cultivada com o consórcio de soja e capim-aruaana no município de Botucatu, SP.....	65
Tabela 11 – População de plantas ha ⁻¹ , altura de plantas (ALTP), altura de inserção da primeira vagem (AIPV), número de vagens por planta (NVP) e número de grãos por vagem (NGV) na cultura da soja consorciada com capim-aruaana, em função do ano agrícola e histórico de consórcio.	66
Tabela 12 – Produtividade de massa seca (PMS) de plantas de soja, capim-aruaana e silagem de planta inteira de soja + capim-aruaana em função do ano agrícola e histórico de consórcio.....	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1	Os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPAs)	21
2.2	Qualidade física e química do solo em sistemas de produção conservacionistas.....	23
2.3	Sistema ILP como estratégia de conservação do solo.....	26
2.4	Rotação, sucessão e consórcio de culturas em SIPAs	27
3	MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1	Caracterização da área experimental.....	30
3.2	Delineamento experimental e tratamentos	32
3.2	Histórico da área experimental	32
3.3	Condução do experimento na safra 2018/2019	33
3.4	Condução do experimento na safra 2019/2020	35
3.5	Coletas e análises de solo	36
3.5.1	Atributos químicos.....	36
3.5.2	Atributos físicos	37
3.5.2.1	Determinação da densidade e porosidade do solo	38
3.5.2.2	Tamanho e estabilidade de agregados.....	38
3.5.2.3	Resistência do solo à penetração.....	40
3.6	Amostragem, avaliações e análises de plantas	40
3.6.1	Produtividade de palhada e acúmulo de C e N	40
3.6.2	Teores nutricionais de plantas de soja e palhada	41
3.7	Produtividade de massa seca de soja e capim-arua para silagem...41	
3.8	Análise estatística	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Atributos físicos do solo	43

4.2	Atributos químicos do solo	49
4.3	Acúmulo de C e N na palhada sobre o solo.....	60
4.4	Concentração de nutrientes na cultura da soja e palhada	63
4.5	Componentes de produção da soja e produtividade de silagem	65
5	CONCLUSÕES	68
	REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

Diante do cenário atual da agricultura brasileira, tem se buscado estratégias para minimizar a dependência de importações de insumos agrícolas, sobretudo fertilizantes, mantendo a alta produção de alimentos dos sistemas de produção do país. Nesse sentido, se destaca o emprego de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA), que tem como principal benefício a melhoria da qualidade física, química e biológica do solo, proporcionando condições favoráveis ao desenvolvimento das plantas e reduzindo a quantidade de insumos, sendo assim uma estratégia de grande relevância para a sustentabilidade na produção agropecuária brasileira.

Sistemas agrícolas tradicionais baseados em monoculturas e rotações agrícolas curtas e contínuas, principalmente com soja e milho, por muito tempo conferiram significativos rendimentos produtivos no Brasil, particularmente nas últimas décadas. No entanto, esse modelo contínuo de exploração agrícola vem resultando em muitos efeitos negativos para os sistemas produtivos (SILVA et al., 2014; FERREIRA et al., 2020; POLIDORO et al., 2021). Sendo assim, uma estratégia para atenuar os impactos negativos da implantação de um sistema agropecuário nos atributos do solo, é a adoção de práticas conservacionistas que permitam o aumento e manutenção da biodiversidade nos sistemas.

Em suma, os SIPAs são caracterizados por permitir, em diferentes escalas, a exploração animal e agrícola dentro de uma mesma área, simultânea ou alternadamente e em rotação ou sucessão (MACEDO, 2009; MORAES et al., 2014). Além disso, os SIPAs têm como princípios básicos a semeadura direta de culturas com mínima perturbação do solo, cobertura permanente do solo por resíduos culturais ou culturas de cobertura e diversificação das espécies de plantas utilizadas, englobando o conceito de agricultura conservacionista, elaborado pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), que vê esses princípios como fundamentais para alcançar a sustentabilidade da agricultura (ANDERSON, 2016).

No Brasil, as áreas ocupadas por SIPAs estão em constante crescimento desde a safra de 2005/2006, saindo 1,87 milhões para aproximadamente 17,43 milhões de hectares de área sob SIPAs na safra 2020/2021, representando um aumento de quase 10 vezes em um período de 15 anos (POLIDORO et al., 2021).

Nesse ritmo, o Brasil caminha para se consolidar de vez como o país com a agricultura mais sustentável no mundo.

Contudo, é necessário ter persistência para alcançar tais benefícios, sendo que, de acordo com Nouri et al. (2019), alterações positivas na qualidade do solo, especialmente na estrutura do solo, provocadas pelos SIPAs, podem não ser evidente logo após os anos iniciais à adoção do manejo. Nesse sentido, maior compreensão dos efeitos diretos e indiretos dos SIPAs, são visíveis através de ensaios agronômicos que avaliam os efeitos da adoção de SIPAs a longo prazo, sendo úteis para avaliação das relações entre o manejo do sistema agrícola, funcionamento do solo e produtividade da cultura (KULAGOWSKI et al., 2021).

Embora os principais benefícios dos SIPAs na qualidade do solo sejam alcançados com o tempo, outro componente importante desse sistema pode ser beneficiado em pouco tempo, que é o caso do componente animal, ou seja, a consorciação com espécies forrageiras proporciona a produção de forragem, podendo ser ensilada ou pastoradas pelos animais entre cada ciclo das culturas.

A presença do animal, por sua vez, quando a intensidade de pastejo é manejada adequadamente, respeitando a altura ideal de entrada e saída dos animais de acordo com cada espécie vegetal, pode estimular a renovação de raízes e liberação de exsudatos radiculares, modificando as rotas e a dinâmica da ciclagem de nutrientes no sistema, através do aporte de matéria orgânica no solo, beneficiando a cultura em sucessão (ALVES et al., 2020; FRANZLUEBBERS e STUEDEMANN, 2014; CARVALHO et al., 2010).

Muitos dos benefícios dos SIPAs são conferidos em função do efeito residual da palhada mantida na superfície do solo, sendo assim, a escolha das espécies vegetais para compor o sistema produtivo influencia na longevidade desse efeito residual em SIPAs, sobretudo disponibilidade de nutrientes para as culturas em sucessão (COSTA et al., 2021; PARIZ et al., 2020).

Diante do exposto, esse trabalho teve como objetivo avaliar as características físicas e químicas do solo, bem como o desenvolvimento da cultura da soja em consórcio com capim-aruaana para a produção de silagem, em função do histórico de cultivo de milho consorciado com capim-marandu e em consórcio com capim-marandu + feijão-guandu, para a produção de silagem.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPAs)

Conceitualmente, entende-se por Sistemas Integrados de Produção Agropecuária, sistemas produtivos planejados envolvendo interações temporais e espaciais em diferentes escalas com exploração animal e agrícola dentro de uma mesma área, simultânea ou alternadamente e em rotação ou sucessão, tendo o objetivo de alcançar sinergismo entre os componentes vegetal e animal, bem como aproveitar seus respectivos efeitos residuais, minimizando e otimizando a utilização de agroquímicos, dessa forma, diminuindo impactos ao meio ambiente visando a sustentabilidade na produção agropecuária, em função das interações solo-planta-animal-atmosfera (MACEDO, 2009; MORAES et al., 2014; CARVALHO et al., 2014).

Com a diversificação estratégica das atividades de agricultura e pecuária em um mesmo ambiente produtivo, proposta pelos SIPAs, ambos segmentos são beneficiados. Nas áreas de pecuária, a introdução da lavoura tem sido utilizada principalmente para reforma ou recuperação de pastagens degradadas ou com baixa produtividade (KLUTHCOUSKI et al., 2007). Nas áreas de agricultura sob sucessão de cultivos, os principais objetivos da implantação de SIPAs são a produção de forragem para os animais no período da entressafra (estação seca) e a formação de palha visando conferir a conservação do solo (PARIZ et al., 2017a; COSTA et al., 2017).

Dessa forma, os SIPAs se tornam uma alternativa para a recuperação de áreas degradadas em regiões de clima tropical e subtropical, como o Brasil (BONETTI et al., 2015), uma vez que nesses sistemas a manutenção e melhoria do funcionamento do solo é impulsionada pela contínua produção de biomassa acima e abaixo do solo, mantendo um fluxo contínuo de nutrientes e compostos orgânicos e melhoria do balanço hídrico, além de favorecer a atividade biológica do solo regulando a transformação de carbono, manutenção da estrutura do solo e ciclagem de nutrientes (HOBBS, 2007; SCOPEL et al., 2013; KULAGOWSKI et al., 2021).

Há diferentes possibilidades de configuração de um SIPA, combinando até dois ou três componentes. Segundo Balbino et al. (2011) os SIPAs são classificados basicamente em quatro grandes grupos, sendo eles: integração lavoura-pecuária (ILP), integração pecuária-floresta (IPF), integração lavoura-floresta (ILF) e

integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Dentre esses, o sistema ILP é o mais adotado por produtores brasileiros, representando cerca de 83% dos mais de 17 milhões de hectares ocupados com sistemas de integração (POLIDORO et al., 2021). Dentre os principais motivos para a adoção de SIPAs por parte dos agricultores e pecuaristas estão o aumento da rentabilidade por hectare, redução do impacto ambiental, recuperação de pastagem e diminuição do risco financeiro.

Vale ressaltar que os SIPAs se baseiam no conceito da agricultura conservacionista, que visam sobretudo, a melhoria da qualidade do solo, que por sua vez é caracterizada pela capacidade do solo em produzir boa quantidade e qualidade de alimentos e fibras, favorecendo uma boa relação entre os serviços ecossistêmicos (KIBBLEWHITE et al., 2008).

Dentre os benefícios do SIPAs se destaca a alta capacidade de fornecimento de carbono orgânico para o solo, favorecendo a ciclagem de nutrientes, como demonstrado por Franzluebbbers (2007), que a partir de 40 observações pareadas, verificou que o sequestro de C orgânico do solo foi $0,53 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em sistemas de cultivo com cobertura vegetal, enquanto em sistemas de cultivo sem cobertura vegetal o sequestro de foi de $0,28 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Dessa forma, em SIPAs com cultivo de plantas de cobertura em rotação com a cultura comercial pode melhorar a qualidade do solo por aumentar o estoque de carbono (ROSOLEM e CALONEGO, 2013).

No entanto, devido à alta exigência nutricional das cultivares modernas, a sucessão milho após soja adotada em muitas regiões produtoras, pode não ser suficiente para atender as demandas nutricionais da cultura sucessora. Ademais, essa contínua sucessão pode reduzir a biodiversidade, aumentar a resistência de pragas, doenças e plantas daninhas ao controle químico, reduzir o aporte de carbono orgânico no solo, afetando a atividade microbológica, favorecendo a emissão de gases de efeito estufa e degradação física do solo, ocasionada pela compactação e erosão dos solos, ou seja, prejudicando a qualidade do solo nesse sistema (FRANZLUEBBERS, 2002; LANDERS, 2007; OLIVEIRA et al., 2019).

Acerca de um contexto social, a intensificação de áreas agrícolas através dos SIPAs permite o aumento de produtividade de alimentos de origem vegetal e animal, sem a necessidade de abertura de novas áreas, atendendo assim a crescente demanda por alimentos em função do aumento da população mundial, ao passo em que fomenta a necessidade de pesquisas relacionadas ao incremento da

produtividade das culturas associada à conservação dos recursos naturais, nesse sentido, no atual contexto socioeconômico do mundo, não há justificativas para que áreas agricultáveis permaneçam improdutivas ao longo do ano (FERREIRA et al., 2018; SILVA et al., 2014; MORAES et al., 2014).

2.2 Qualidade física e química do solo em sistemas de produção conservacionistas

A qualidade do solo ou saúde do solo, é definida como a capacidade de um solo produzir alimentos e fibras em boa qualidade e quantidade, associadas à prestação de outros serviços ecossistêmicos (FRANZLUEBBERS, 2002; KIBBLEWHITE et al., 2008). Todavia, solos que não possuem essas características podem receber intervenções de manejo que proporcionem melhoras significativas na sua qualidade física, tornando-os viáveis para produção agropecuária (CARMEIS FILHO et al., 2016).

O principal sistema conservacionista utilizado por agricultores brasileiros é o Sistema Plantio Direto (SPD) com as culturas de milho e soja, logo a produtividade de grãos é o principal indicador usado pelos agricultores para avaliar o desempenho do seu sistema de produção (KULAGOWSKI et al., 2021). Sendo assim, o uso combinado de técnicas de manejo conservacionistas aumenta a sinergia entre as propriedades que influenciam o desempenho produtivo do sistema, melhorando a qualidade do solo que irá refletir no aumento de produtividade.

Nesse sentido, muitos estudos têm demonstrado que SIPAs sob condições de SPD com pastejo moderado podem melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (SILVA et al., 2014; CARVALHO et al., 2010; FERREIRA et al., 2018; ALVES et al., 2020; EBERHARDT et al., 2021) além de mitigar a emissão de gases de efeito estufa (SAVIAN et al., 2018; FRANZLUEBBERS, 2007; ZHANG et al., 2018).

Dentre os fatores que conferem melhor qualidade do solo, os atributos físicos estão entre os mais relevantes, pois sem condições físicas adequadas é impossível ter um solo quimicamente e biologicamente ideal, ou seja, a estrutura do solo é a base para a melhoria dos demais atributos. Sendo assim, ações que prejudicam as características físicas do solo têm implicações negativas quanto a qualidade desse solo, tornando-o cada vez mais improdutivo (FAUSTINO e MARCIANO, 2021). Em

suma, a qualidade do solo passa pela manutenção e melhoria dos seus atributos físicos, e aliado à manutenção e melhoria dos recursos ar e água tem-se um solo com alta capacidade de produção de alimentos.

Um solo é considerado fisicamente ideal quando apresenta em média 34% do volume de poros ocupados por gases e 66% por água (SKOPP et al., 1990), para que ocorram trocas de energia que possibilitam mineralizar os restos culturais e disponibilizar nutrientes para as plantas. Sendo assim, o uso de estratégias que minimizem a compactação e principalmente perdas de solo (por erosão), causando a desagregação, são extremamente importantes para garantia de uma produção satisfatória (OLIVEIRA et al., 2019).

Contudo, a intensidade das alterações dos atributos físicos do solo pode variar de acordo com o teor de matéria orgânica, umidade do solo e a biomassa vegetal sobre o solo. Segundo Marchão (2007), a melhoria da qualidade física do solo pela inclusão de pastagens na rotação de culturas se dá por três efeitos principais: ausência de preparo durante o ciclo da pastagem, presença de um denso sistema radicular atuando como agente agregante e aumento da atividade da macrofauna do solo.

Nessa linha de raciocínio, o fornecimento contínuo de material orgânico por resíduos vegetais e/ou por excreções radiculares, cujos subprodutos são constituídos por moléculas orgânicas em diversas fases de decomposição, atuam como agentes de formação e estabilização dos agregados, proporcionando uma melhor estruturação do solo em profundidade (CARMEIS FILHO et al., 2016; BONINI et al., 2017; CALONEGO et al., 2017). Dessa maneira, a formação de palhada é essencial para a proteção, estruturação e redução da erosão, por meio de sistemas radiculares capazes de permitir a manutenção do solo em densidades adequadas ao desenvolvimento radicular das culturas, beneficiando as culturas principais do sistema produtivo, como a soja (COSTA et al., 2015; CALONEGO e ROSOLEM, 2010).

A importância da matéria orgânica na melhoria da qualidade do solo é enfatizada em diversas pesquisas (FRANZLUEBBERS, 2002; CASTRO et al., 2015; COSTA et al., 2015; BONINI et al., 2017). De acordo com esses autores, a MO proporciona o aumento da porosidade e da retenção de água, por meio da formação de grânulos no solo, podendo servir como fonte de minerais para as plantas, pois a ela estão ligados o nitrogênio, o fósforo e o enxofre, além de propiciar o

desenvolvimento da comunidade microbiana do solo, formada principalmente por bactérias e fungos que atuam na sua decomposição.

Assim, os sistemas conservacionistas podem melhorar a qualidade do solo, em razão da maior produção de palhada no consórcio, o que beneficia a cobertura do solo, proporciona maior aporte de matéria orgânica que contribui para a ciclagem de nutrientes, melhora a infiltração e armazenagem de água, a exploração do perfil do solo pelas raízes, a diminuição do processo erosivo, o residual de adubações das culturas anteriores, maximizando a utilização do solo (COSTA et al., 2015; CALONEGO et al., 2017; PARIZ et al., 2017a; NOURI et al., 2019; FRANZLUEBBERS, 2007)

Por outro lado, mesmo em sistemas conservacionista, como o SPD, tem se tornado comum o aumento da densidade do solo na camada subsuperficial, porém aportes adicionais de biomassa associada ao aumento da atividade biológica podem acelerar a recuperação desse solo, além de favorecer o acúmulo de carbono e nitrogênio (CALONEGO e ROSOLEM, 2010; ALVES et al., 2020). Fato esse que foi demonstrado no estudo de Cotrufo et al. (2015) onde verificaram que em sistemas com manutenção da cobertura do solo quantidade significativa de 19% do carbono mineralizado é transferido para o solo, onde contribui para a formação da matéria orgânica do solo.

No que diz respeito a qualidade química do solo em áreas manejadas com sistemas conservacionistas, os benefícios são conferidos, em grande parte, através do processo de mineralização da matéria orgânica, favorecendo a atividade biológica e ciclagem de nutrientes no sistema. Além disso, em solos com manutenção da cobertura vegetal, os exsudatos radiculares garantem maior aporte de nutrientes aos microrganismos, que mantêm a energia livre para mineralizar C, N e demais nutrientes essenciais às culturas agrícolas (PEREIRA e SILVA et al., 2011).

Entretanto, a manutenção da cobertura vegetal sob o solo depende da espécie utilizada, época de semeadura da planta de cobertura, manejo de fertilizantes, estágio de dessecação, relação C/N e lignina/N, condições climáticas e tipo de solo (COSTA et al., 2014; 2021; PARIZ et al., 2011), que consequentemente afeta a eficiência do processo de mineralização e liberação dos nutrientes pela palhada.

2.3 Sistema ILP como estratégia de conservação do solo

Dentre os fatores responsáveis para a sustentabilidade dos SIPAs, o solo é considerado um dos mais importantes, ou seja, essa camada que cobre a superfície terrestre e que leva milhões de anos para se formar pode se perder em poucos anos por causa da erosão ou tornar-se improdutivo dependendo do uso e das práticas de manejo adotadas (NOURI et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2019).

Nesse contexto, é evidente que diferentes sistemas de manejo do solo impactam diretamente a sustentabilidade da produção agrícola. O sistema convencional com práticas de aração e gradagem e baixa diversidade de plantas têm sido o principal fator para a redução da qualidade do solo, além disso, sistemas de cultivos agrícolas extensivos com baixo investimento tecnológico têm levado à degradação do solo nessas áreas (BONETTI et al., 2018).

Práticas agrícolas, tais como plantio direto, rotação de culturas, cultivo consorciado, redução de períodos de pousio e uso de irrigação são elementos chaves para a redução de perdas de C e N na agricultura, além disso, essas práticas ajudam a mitigar os impactos negativos da intensificação da agricultura aos recursos naturais, sendo dessa forma indispensáveis em uma agricultura baseada na conservação do solo (DALMAGRO et al., 2022; TAGHIZADEH-TOOSI et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2019).

Contudo, é importante salientar que maiores benefícios dos sistemas integrados na qualidade do solo são alcançados a longo prazo, como mostra o trabalho de Dhaliwal e Kumar (2021), que observaram incremento no estoque de C no solo, macroporosidade, porosidade total, taxa de infiltração e condutividade hidráulica do solo além de redução da densidade do solo e resistência do solo à penetração em área com 30 anos sob SIPA, enquanto em uma área com 4 anos sob SIPA essas propriedades não foram afetadas. Demonstrando que, de fato a manutenção permanente da cobertura do solo ao longo dos anos, é importante para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, devido o aporte de carbono orgânico (BONETTI et al., 2018; CORBEELS et al., 2016).

Entretanto, mesmo sendo incontestável a influência positiva das práticas de uma agricultura conservacionista, especialmente no solo, conservando ao mesmo tempo a produção e os serviços ecossistêmicos (KULAGOWSKI et al., 2021; PITTELKOW et al., 2015), as ligações entre essas práticas, qualidade do solo e o

desempenho produtivo dos SIPAs permanecem pouco difundidas em muitas regiões agrícolas brasileiras, que pode ser um dos motivos para ainda se ter grandes áreas com solos degradados no país.

Vale ressaltar que, a maioria dos solos brasileiros, degradados, estão sob uso de pastagem. De acordo com recente levantamento do MapBiomass (2021), dos quase 155 milhões de hectares cultivados com pastagens no Brasil, estima-se que pouco mais de 50% apresentam algum grau de degradação, com ocorrência em todos os biomas brasileiros, no bioma cerrado cerca de 27 milhões de hectares de pastagem apresentam sinais de degradação. O mesmo levantamento mostrou também que houve uma queda de 17% na degradação de pastagens brasileira entre os anos 2000 e 2020, sendo boa parte dessa redução resultado da inserção de SIPAs nessas áreas.

Sendo assim, a degradação do solo nessas áreas de pastagem leva ao menor desenvolvimento de plantas, que por sua vez reduzem a produção de forragem, com isso o solo fica mais exposto e sujeito à compactação pelo pisoteio dos animais, além de favorecer as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Logo, sob as condições de pastagem degradada tem-se maior efeito negativo quanto a qualidade do solo e emissão de GEE e menor produtividade, caracterizando a atividade pecuária nessas áreas como de baixa eficiência e poluidora (FIGUEIREDO et al., 2017).

Dessa forma, a fim de contornar a degradação do solo em áreas com essa situação é possível lançar mão do uso do sistema ILP, sendo um sistema já bastante difundido em todas as regiões do Brasil, entretanto ainda não muito utilizado pela maioria dos produtores/pecuaristas.

2.4 Rotação, sucessão e consórcio de culturas em SIPAs

Atualmente, no Brasil, se pratica bastante o cultivo das culturas de soja e milho em sucessão, principalmente em SSD ou SPD, estando em constante crescimento, abrangendo na safra 2021/2022 pouco mais de 16 milhões de hectares cultivados com essa sucessão (CONAB, 2022). Assim como nos SPDs, em SIPAs é imprescindível a realização da rotação e sucessão de culturas, uma vez que esta prática traz inúmeros benefícios para o sistema produtivo, além disso, é uma estratégia que viabiliza o sistema (MORAES et al., 2014).

Os SIPAs permitem ainda o consórcio e ou rotação com culturas de cobertura, sendo elas espécies leguminosas ou forrageiras, com o principal objetivo de manter o solo coberto por resíduos dessas culturas. Além disso, de acordo com Franzluebbbers (2007), são numerosos os benefícios das culturas de cobertura nos SIPAs, dentre eles estão: o controle da erosão do solo; redução do escoamento de água e nutrientes; contribuição para o aumento do sequestro de C orgânico e da diversidade biológica do solo; se leguminosa, fornece N biologicamente fixado ao sistema de cultivo.

Benefícios da utilização de plantas de cobertura em SPDs também são demonstrados por trabalhos desenvolvidos no cerrado brasileiro (FERREIRA et al., 2019; LAMAS e RICHETTI, 2019), evidenciando um incremento de 55% do teor de C nos primeiros cinco centímetros de profundidade do solo, e em 20% na camada até 0,4 m de profundidade, reduzindo assim a quantidade de carbono emitida para a atmosfera nessas áreas. Isso demonstra que o Brasil tem um grande potencial para ser um dreno de CO₂ em nível mundial, por apresentar grande área de adoção de sistemas de produção com elevada adição de resíduos, graças à rotação de cultura e cultivo de plantas de cobertura na entressafra (LAMAS, 2020).

Há diferentes culturas forrageiras que podem ser utilizadas em SIPAs, como o milheto (*Pennisetum glaucum*), sorgo forrageiro (*Sorghum spp*) e os capins do gênero *Urochloa* (syn. *Brachiaria*), dentre essas se destacam os capins *Urochloa brizantha*, *U. ruziziensis*, que quando cultivados solteiro ou consorciado com *Cajanus cajan* (feijão-guandu) proporcionam o maior acúmulo de nutrientes ao final da entressafra (PACHECO et al., 2013). Além do mais, a utilização de gramíneas forrageiras em sistemas produtivos com rotação de culturas talvez sejam a melhor opção para melhoria da estrutura e consequente qualidade física do solo, devido à alta capacidade de crescimento e distribuição de raízes dessas culturas, além da liberação de exsudatos radiculares, sendo fonte de carbono orgânico para o solo (CALONEGO et al., 2017; CALONEGO e ROSOLEM, 2010; BORGES et al., 2019).

Nesse contexto, resultados de um estudo de Costa et al. (2014a) mostram o elevado potencial de utilização de espécies do gênero *Urochloa* (syn. *Brachiaria*) em SIPAs, tanto na produtividade de forragem no outono quanto na deposição de palhada com altos teores de nutrientes, principalmente N e K sobre a superfície do solo para a cultura em sucessão na região do Cerrado. Além disso, esses sistemas de cultivo diversificados são mais resilientes às mudanças climáticas e estresses

ambientais e têm maior eficiência no uso de nutrientes (COSTA et al., 2021; LEITE et al., 2010).

Portanto, o uso da consorciação de culturas é um dos meios para se elevar a produtividade de SIPAs, além de possibilitar a redução do custo da formação de pastagens e ofertar alimento para o gado no período de entressafra, em que a disponibilidade de forragem é reduzida (GARCIA et al., 2012; PARIZ, et al., 2011; COSTA et al., 2014a).

O cultivo consorciado de milho com gramíneas forrageiras é o sistema de cultivo conservacionista mais difundido entre agricultores e pecuaristas, tendo ampla adoção devido à boa sinergia entre as espécies utilizadas, sendo considerada uma ótima opção para a produção de raiz, fitomassa, acumulação e liberação de nutrientes em sistemas de ILP (PACHECO et al., 2013; SALTON e TOMAZI, 2014). Sendo assim, com a integração lavoura comercial-gramínea perene, seria possível colher grãos e usar a gramínea perene como palha antes do início da estação de cultivo no sistema de plantio direto (CRUSCIOL et al., 2015).

Por outro lado, o consórcio apenas de gramíneas, ao longo dos anos, pode comprometer a sustentabilidade dos SIPAs devido à deficiência de N no solo (GARCIA et al., 2016). Dessa forma, se torna indispensável a inclusão de espécies leguminosas, que por sua vez, tem como principal benefício a ciclagem e fornecimento de N às culturas sucessoras, aumentando sua disponibilidade e reduzindo os custos de aquisição desse nutriente, além de manter a biodiversidade do sistema (CARVALHO et al., 2022; PARIZ et al., 2020; RUSSELLE et al., 2007; SAINJU et al., 2007).

Além de melhorar a qualidade química do solo, Silva e Rosolem (2002) verificaram que o cultivo anterior com a leguminosa feijão-guandu, favoreceu o crescimento radicular da soja, devido a capacidade de romper camadas de solo compactadas. Ademais, o cultivo de leguminosa como cultura de cobertura e/ou adubação verde pode aumentar a quantidade e a estabilidade do C orgânico no solo, sugerindo que essa prática de manejo pode promover a agricultura sustentável (YAO et al., 2019).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Lageado, em área pertencente à Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia (FMVZ/UNESP) no município de Botucatu/SP (22°51'01"S e 48°25'28"W, com altitude de 777 metros), durante as safras de 2018/2019 e 2019/2020. O solo do local é classificado como um Latossolo Vermelho Distrófico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018), com 280, 90 e 630 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente, caracterizando uma textura argilosa.

Foi realizada uma caracterização química do solo da área em setembro de 2013, seguindo metodologia propostas por Raij et al. (2001), cujo resultados são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Caracterização química do solo nas camadas de 0,0 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m na área experimental em setembro de 2013

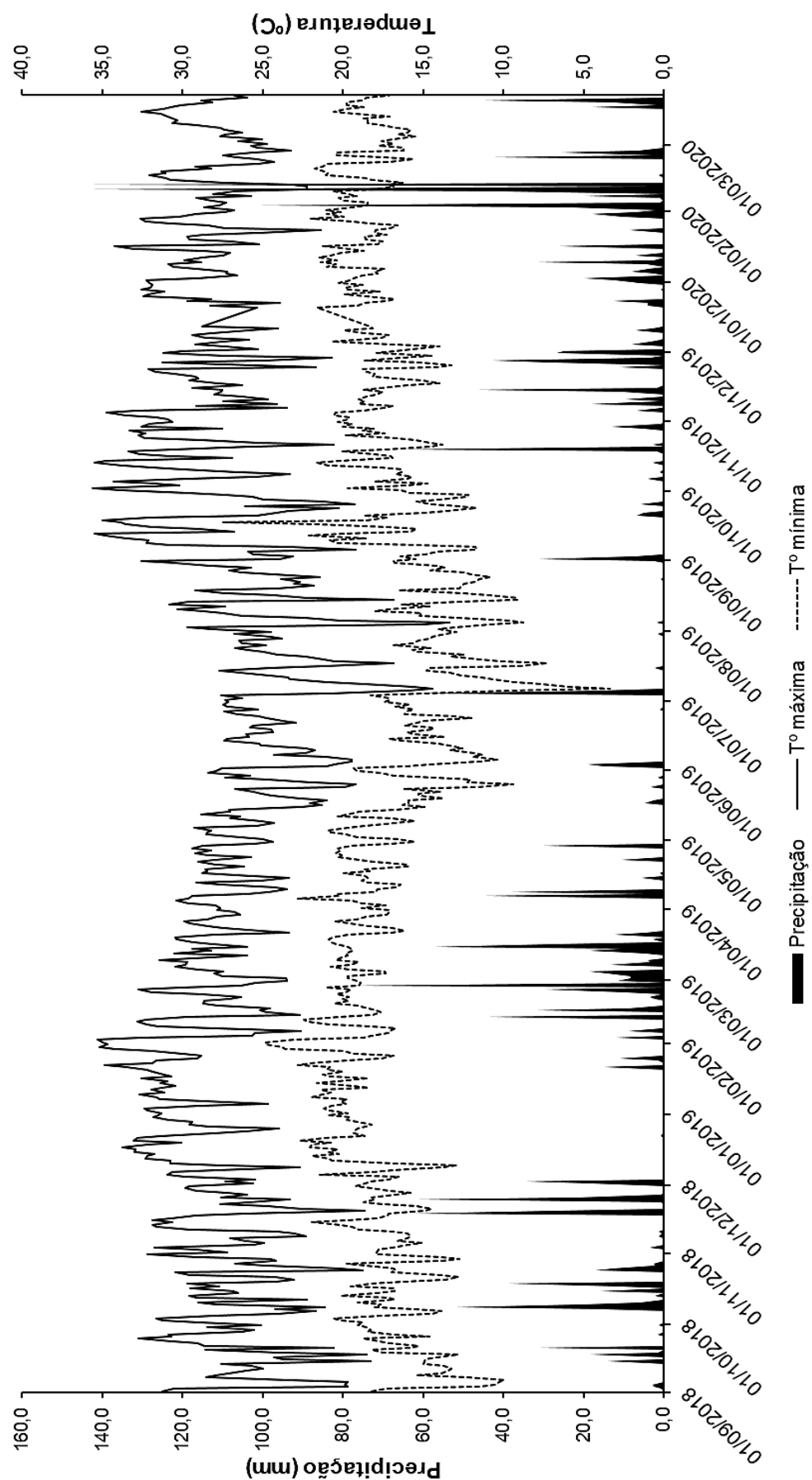
Camada	pH	MO ¹	P _(resina)	H+Al	K	Ca	Mg	CTC ²	V ³
m	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmol _c dm ⁻³ -----					%
0,0 - 0,2	5,1	38,1	12,2	41,4	1,0	31,5	15,8	89,7	53,8
0,2 - 0,4	4,8	38,0	5,5	59,6	0,7	21,9	11,4	93,6	36,3

¹Matéria Orgânica; ²Capacidade de Troca de Cátions; ³Saturação por bases

De acordo com a classificação de Köppen, o clima predominante na região é do tipo Cwa, que se caracteriza pelo clima tropical de altitude, com inverno seco e verão quente e chuvoso (ALVARES et al., 2013).

A precipitação média anual para Botucatu é de 1.501 mm, sendo que as médias históricas de outubro a março correspondem a 74,8% do total anual, com 1.123 mm e, os meses de abril a setembro correspondem a 25,2% do total anual, com 379 mm. Os dados de precipitação e temperatura média mensal nos dois anos de condução da pesquisa estão descritos na Figura 1.

Figura 1 – Precipitação e temperatura máxima e mínima durante a condução da pesquisa, no período de setembro de 2018 a março de 2020, Botucatu, SP



3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi constituído por blocos casualizados em esquema fatorial duplo 2 x 2, sendo dois históricos de consórcio e dois anos agrícolas, com 5 repetições. Os históricos de consórcio consistiram em dois SIPAs, sendo o primeiro composto pelo cultivo da cultura da soja para produção de silagem de planta inteira em consórcio simultâneo com capim-aruana (*Megathyrsus maximus* cv. Aruana), em sucessão ao cultivo da cultura do milho para ensilagem em consórcio simultâneo com capim-marandu, com pastejo por ovinos no inverno/primavera (MB); o segundo foi composto pela cultivo da cultura da soja para produção de silagem de planta inteira em consórcio simultâneo com capim-aruana, em sucessão ao cultivo da cultura do milho para ensilagem em consórcio simultâneo com capim-marandu e feijão-guandu, com pastejo por ovinos no inverno/primavera (MBG). Ambos os históricos de consórcio contaram com sobressemeadura de aveia preta para o pastejo por ovinos. Cada parcela foi constituída por 25 m de largura e 20 m de comprimento.

3.2 Histórico da área experimental

Até o ano de 2005 a área foi ocupada pelo cultivo de milho e sorgo para a produção de silagem, posteriormente ficou em pousio até outubro/2010, com predominância de capim braquiariinha (*Urochloa decumbens* cv. Basilisk). A partir de então, nos anos agrícolas 2010/2011 e 2011/2012, a área foi utilizada para produção de silagem de milho em consórcio com braquiária, com posterior sobressemeadura de aveia amarela e pastejo por cordeiros entre os meses de agosto e novembro (PARIZ et al., 2017b).

No ano agrícola 2012/2013, foi realizado o cultivo de soja em consórcio com capim-aruana para produção de silagem de planta inteira, sendo a pastagem manejada em regime de corte entre os meses de agosto e outubro do mesmo ano (PARIZ et al., 2016; 2017a). Em seguida, por três safras consecutivas (2013/14, 2014/15 e 2015/16) a área foi ocupada pelos cultivos consorciados de milho + capim-marandu e de milho + capim-marandu + feijão-guandu para a produção de silagem, com posterior sobressemeadura de aveia preta e pastejo por cordeiros entre os meses de julho a setembro de cada ano (PARIZ et al., 2020).

No dia 20 de setembro de 2016 foi realizada uma calagem superficial, utilizando-se 1.500 kg ha^{-1} de calcário dolomítico, seguindo recomendações de Raij et al. (1997), em seguida a área foi novamente utilizada para a produção de silagem de milho em consórcio com capim-marandu e milho consorciado com capim-marandu e feijão-guandu, com sobressemeadura de aveia na linha e pastejo por ovinos no inverno, até a safra de 2017/2018 (CRUZ, 2020).

3.3 Condução do experimento na safra 2018/2019

Em 04 de outubro de 2018 foi iniciada a condução do experimento do presente trabalho com a dessecação das plantas presente na área experimental, aplicando os herbicidas glyphosate e 2,4-D amine nas doses de $2,88 \text{ kg ha}^{-1}$ e $0,67 \text{ kg ha}^{-1}$ do equivalente ácido, respectivamente.

Posteriormente, no dia 22 de outubro de 2018 foi semeada a cultivar de soja TMG 7062 - IPRO (Grupo de maturação 6.2) com hábito de crescimento “semideterminado” utilizando semeadora-adubadora modelo PDGP Tatu Marchesan para SSD, com densidade de $300.000 \text{ sementes ha}^{-1}$ e espaçamento entrelinhas de 0,45 m. As sementes foram tratadas com fungicida à base de carboxina + tiram na dose de $0,06 \text{ kg dos i.a. por } 100 \text{ kg de sementes}$ e inseticida à base de tiametoxam na dose de $0,10 \text{ kg do i.a. por } 100 \text{ kg de sementes}$. Em seguida as sementes foram inoculadas com inoculante líquido, contendo bactérias simbiotes da espécie *Bradyrhizobium japonicum* (na concentração de 7×10^9 unidades formadoras de colônia mL^{-1}), utilizando dose de 0,6 L por 50 kg de sementes. Também foi misturado às sementes fertilizante mineral líquido à base de P_2O_5 , Mo e Co ($0,426$; $0,284$ e $0,028 \text{ kg L}^{-1}$, respectivamente), na dose de 0,2 L do produto comercial ha^{-1} . A adubação mineral de semeadura contou com aplicação de 320 kg ha^{-1} do adubo formulado 0-24-24 (24% de P_2O_5 ; 24% de K_2O), baseado nas recomendações de Ambrosano et al. (1997). A emergência plena das plantas foi observada no dia 28 de outubro de 2018, ou seja, 6 dias após a semeadura.

O capim-aruaia foi semeado na linha da cultura da soja, em mistura prévia das sementes com o adubo, na quantidade de 600 pontos de valor cultural (VC) ha^{-1} , conforme recomendação de Kluthcouski e Yokoyama (2003). Devido à colheita para ensilagem, aos 30 dias após a emergência (DAE) das plântulas de soja foi realizada de forma manual uma adubação potássica de cobertura aplicando-se 90 kg ha^{-1} de

K₂O (150 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio-KCl) o adubo foi jogando ao lado das plantas em cada linha de plantio.

O controle de doenças da soja foi realizado com quatro aplicações, utilizando-se os seguintes fungicidas: Orkestra® (fluxapiroxade 167 g L⁻¹ + piraclostrobina 333 g L⁻¹) na dose de 0,3 L ha⁻¹; Nativo® (trifloxistrobina 100 g L⁻¹ + tebuconazol 200 g L⁻¹) na dose de 0,6 L ha⁻¹; Fox® (trifloxistrobina 150 g L⁻¹ + prothioconazol 175 g L⁻¹) na dose de 0,4 L ha⁻¹; Elatus® (azoxistrobina 300 g kg⁻¹ + benzovindiflupir 150 g kg⁻¹) na dose de 0,25 kg ha⁻¹. Também foram realizadas 4 aplicações para o controle de pragas com os respectivos inseticidas: Engeo Pleno® (tiametoxam 141 g L⁻¹ + lambda-cialotrina 106 g L⁻¹) na dose de 0,15 L ha⁻¹; Premio® (clorantroprole 200 g L⁻¹) na dose de 0,05 L ha⁻¹; Engeo Pleno® (tiametoxam 141 g L⁻¹ + lambda-cialotrina 106 g L⁻¹) na dose de 0,2 L ha⁻¹; Galil® (imidacloprido 250 g L⁻¹ + bifentrina 50 g L⁻¹) na dose de 0,4 L ha⁻¹. As aplicações foram realizadas nos estádios V₄, V₆, R₁ e R₄, baseada na necessidade da cultura através de constantes monitoramentos da lavoura.

Adicionalmente, no estágio de desenvolvimento V₄ da soja foi aplicado o herbicida Basagran® (bentazona 600 g L⁻¹) na dose de 1,2 L ha⁻¹, para o controle das plantas daninhas erva-quente (*Spermacoce latifolia*) e nabiça (*Raphanus raphanistrum*). Houve ainda a necessidade de aplicação de subdose de glifosato (0,25 L ha⁻¹) a fim de se retardar o crescimento do capim-aruaana.

A colheita mecânica da cultura da soja em consórcio com capim-aruaana para ensilagem ocorreu no dia 20 de fevereiro de 2019 (115 DAE), quando as plantas de soja se encontravam no estágio fenológico R₇ (início da maturação dos grãos e 50% de folhas amareladas), de acordo com classificação de Fehr e Caviness (1977) e recomendação de Leonel et al. (2008). A colheita foi realizada na altura de 0,15 m utilizando-se colhedora de forragem de precisão modelo JF 1600 AT (12 facas). O material foi colhido, picado em partículas médias entre 3 e 6 mm e armazenado em silo tipo “bag” de 1,50 m de diâmetro (embolsadora de forragem), com compactação de 600 kg m⁻³ de massa verde.

No dia 09 de maio de 2019 iniciou-se o pastejo por ovinos na área experimental. Foram utilizadas 12 borregas mestiças (cruzamento Ile de France × White Dorper × Texel) na fase de recria para cada tratamento, oriundas de uma criação comercial. O sistema de pastejo adotado foi o contínuo, os piquetes foram delimitados com cerca elétrica de seis fios e os animais tinham livre acesso à água.

A partir das 07:00h, as borregas eram alocadas em seus respectivos piquetes e recolhidas a partir das 17:00h em um galpão coberto. Nas baias, as borregas eram suplementadas com concentrado + silagem proveniente do mesmo tratamento. O período de pastejo foi de 112 dias, entre os meses de maio e agosto de 2019.

3.4 Condução do experimento na safra 2019/2020

Aos 39 dias do fim do pastejo por ovinos iniciou as atividades da safra 2019/2020, com dessecação do capim-aruaana presente na área, no dia 07 de outubro de 2019, utilizando os herbicidas Glifosato WG e 2,4 D, nas doses de 2,88 kg ha⁻¹ e 0,67 kg ha⁻¹ dos respectivos dos equivalentes ácidos. Devido alta massa vegetal, o capim-aruaana não foi controlado na primeira dessecação, então foi necessário utilizar o triturador de palha e em seguida aplicar o herbicida Glifosato WG na dose 2,16 kg ha⁻¹ do equivalente ácido associado ao adjuvante Aureo® (éster metílico de óleo de soja 720 g L⁻¹), na dose de 0,25 L ha⁻¹.

A semeadura da soja foi realizada no dia 02 de dezembro de 2019, utilizando-se a cultivar TMG 7062 - IPRO (Grupo de maturação 6.2) com hábito de crescimento “semideterminado” utilizando semeadora-adubadora modelo PDGP Tatu Marchesan para SSD, com densidade de 300.000 sementes ha⁻¹ e espaçamento entrelinhas de 0,45 m. O tratamento de sementes e inoculação foi igual ao realizado na safra 2018/2019. A adubação mineral de semeadura foi composta 85 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 60 kg ha⁻¹ de K₂O, baseado nas recomendações de Ambrosano et al. (1997). No dia 08 de dezembro de 2019, 6 dias após a semeadura, foi observado a emergência plena das plântulas.

Semelhante ao que foi realizado na safra anterior, as sementes de capim-aruaana foram misturadas previamente com o adubo mineral, na quantidade de 600 pontos de VC ha⁻¹, conforme recomendação de Kluthcouski e Yokoyama (2003). No entanto, devido a rebrota do capim-aruaana da safra anterior, foi necessário a aplicação de glifosato em pós emergência (2,16 kg ha⁻¹ do equivalente ácido), com isso, o capim-aruaana semeado na linha da soja foi morto, dessa forma foi realizada novamente a semeadura do capim junto à adubação potássica de cobertura aos 35 DAE, utilizando os mesmos 600 pontos de VC ha⁻¹. A adubação potássica, por sua vez, foi realizada na dose de 60 kg ha⁻¹ de K₂O (100 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio-

KCl), a aplicação foi feita a lanço com auxílio de distribuidor de adubo mecânico, acionado por trator.

O controle de doenças da soja foi realizado com três aplicações, utilizando os fungicidas: Orkestra® (fluxapiraxade 167 g L⁻¹ + piraclostrobina 333 g L⁻¹) na dose de 0,5 L ha⁻¹; Fox® (trifloxistrobina 150 g L⁻¹ + protioconazol 175 g L⁻¹) na dose de 0,4 L ha⁻¹; Elatus® (azoxistrobina 300 g kg⁻¹ + benzovindiflupir 150 g kg⁻¹) na dose de 0,20 kg ha⁻¹. O controle de pragas foi realizado com duas aplicações do inseticidas Engeo Pleno (tiametoxam 141 g L⁻¹ + lambda-cialotrina 106 g L⁻¹) na dose de 0,20 L ha⁻¹. As aplicações foram realizadas baseada na necessidade da cultura através de constantes monitoramentos da lavoura.

Assim como na safra anterior, no estágio de desenvolvimento V₄ da soja foi aplicado o herbicida Basagran® (bentazona 600 g L⁻¹) na dose de 1,2 L ha⁻¹, para o controle de plantas daninhas erva-quente, nabiça e leiteiro (*Euphorbia heterophylla*). Também, houve a necessidade de aplicação de subdose de glifosato WG (0,28 kg ha⁻¹) associado ao adjuvante Assist® (0,8 L ha⁻¹) a fim de retardar o crescimento do capim-aruaana.

A colheita da cultura da soja em consórcio com capim-aruaana foi realizada no dia 21 de março de 2020 (104 DAE), quando as plantas de soja se encontravam no estágio fenológico R₇ seguindo recomendação de Leonel et al. (2008). A colheita foi realizada manualmente, coletando-se amostras de 10 plantas de soja e capim-aruaana em cada parcela experimental, para determinação da massa seca e estimativa da produção de silagem. Nesse ano agrícola, após a colheita da soja e do capim-aruaana, não foi realizado o pastejo por ovino.

3.5 Coletas e análises de solo

3.5.1 Atributos químicos

As coletas de solo para análise dos atributos químicos foram realizadas nos dias 05 de outubro de 2018 e 04 de outubro de 2019, ao fim do pastejo pelos animais. Utilizou-se trado tubular e fez-se retiradas em cinco pontos amostrais por parcela, nas camadas de 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,40 m.

As amostras coletas foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de 2 mm e acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados. A análise

química foi realizada no laboratório de Relações Solo-Planta do Departamento de Produção Vegetal da FCA/UNESP, Botucatu (SP). Foram determinados o pH (CaCl_2), acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$), fósforo (P) (resina), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e enxofre (S) conforme metodologia proposta por Raij et al. (2001). A partir dos resultados, foi calculado a soma de bases (SB), a capacidade de troca de cátions $\text{CTC}_{\text{pH}7}$ e a saturação por bases (V).

Os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) foram obtidos por meio de analisador elementar automático (Modelo TruSpec™ CHNS, da LECO®). O estoque de C e N no perfil do solo foi calculado utilizando os teores de C e N e a densidade do solo de cada camada do perfil em cada unidade experimental, conforme equação 1.

$$\text{Estoque} = d \cdot u \cdot e \quad (1)$$

Em que:

Estoque = estoque de C ou N no solo (Mg ha^{-1});

d = densidade do solo na camada estudada (g cm^{-3});

μ = teor de C ou N no solo (%);

e = espessura da camada estudada (cm).

3.5.2 Atributos físicos

Foram coletadas amostras indeformadas de solo, para análise de estabilidade de agregados, densidade e porosidade do solo, realizadas nos dias 12 de outubro de 2018 e 21 de outubro de 2019. As amostras de solo foram coletadas em trincheiras, abertas manualmente com auxílio de cavadeira, em cada parcela experimental, totalizando 8 trincheiras em cada ano agrícola. As amostras foram retiradas na parede da trincheira nas camadas de 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,40 m.

Para análise estabilidade de agregados, foram coletados monólitos de 0,05 x 0,15 x 0,15 m (altura x largura x comprimento), em cada camada de solo, totalizando 40 amostras por ano agrícola. Enquanto para determinação da densidade e

porosidade, as amostras indeformadas foram coletadas com auxílio de cilindros de inox, com 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro, em duplicata, totalizando 80 amostras por ano agrícola. Os anéis foram envoltos em plástico filme e acondicionados em geladeira, objetivando-se preservar ao máximo a estrutura e umidade do solo até a realização das análises. As amostras foram coletadas de acordo com metodologia descrita em EMBRAPA (2017).

3.5.2.1 Determinação da densidade e porosidade do solo

As amostras coletadas em anéis volumétricos foram saturadas em água por 48 horas, pesadas em balança para verificação do peso saturado, e posteriormente foram submetidas ao potencial matricial de 0,006 MPa em aparelho extrator de Richards (KLUTE, 1986) com placas porosas de cerâmica para suportar pressão de 1 bar. Após atingirem o equilíbrio nesta pressão, retirou-se as mostras do aparelho e procedeu-se a pesagem e secagem das amostras em estufa de aeração forçada a 105° C por 48 horas. Desta forma, foi possível calcular a densidade do solo (DS), pelo quociente da massa das amostras secas e o volume do anel volumétrico; a porosidade total (PT), pela diferença de massa do solo saturado e seco; a macroporosidade (Ma), considerando que a tensão de 0,006 MPa é suficiente para retirar toda a água retida nos macroporos e que a água restante representa o volume de microporos, sendo a microporosidade (Mi) obtida pela diferença entre PT e Ma, de acordo com metodologia descrita em EMBRAPA (2017).

3.5.2.2 Tamanho e estabilidade de agregados

Os torrões indeformados coletados no campo, foram acondicionados em sacos plásticos e posteriormente pré-selecionados em um jogo de peneiras sobrepostas, tendo as peneiras superior e inferior, malhas de 8 e 4 mm, respectivamente. Para a avaliação da estabilidade dos agregados utilizou-se a porção que passou pela malha de 8 mm e ficou retida na de 4 mm. Os agregados do solo pré-selecionados foram avaliados quanto à estabilidade de agregados via úmida, conforme metodologia sugerida por Kemper e Chepil (1965), utilizando o aparelho de oscilação vertical (YODER, 1936).

Cada conjunto foi composto por 5 peneiras com as seguintes malhas: 2,0, 1,0, 0,5, 0,25 e 0,105 mm. A análise de agregados foi realizada em duplicata, com o tamisamento mecânico por 15 minutos em água, realizado por meio de aparelho de oscilação vertical. Com o peso do solo seco de cada classe de agregados, bem como o peso seco total das amostras, os valores de diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) foram calculados através das equações 2 e 3, respectivamente. O índice de estabilidade dos agregados (IEA) foi calculado utilizando a equação 4 (CASTRO FILHO et al., 1998).

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \quad (2)$$

$$DMG = \frac{\exp \sum_{i=1}^n (w_p \cdot \ln w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

Em que:

x_i = diâmetro médio das classes;

w_i = proporção de cada classe em relação ao total;

w_p = peso dos agregados de cada classe (g).

$$IEA = \left(\frac{PAS - w_p 25}{PAS} \right) \times 100 \quad (4)$$

Em que:

PAS= peso da amostra seca;

$w_p 25$ = peso dos agregados menores que 0,25 mm.

3.5.2.3 Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração (RP) foi obtida após as amostras serem submetidas à pressão de 0,006 MPa no parêmetro extrator de Richards (EMBRAPA, 2017). Antes de serem secas em estufa a 105 °C, as amostras foram submetidas ao teste de resistência mecânica à penetração, utilizando um penetrômetro de bancada da marca Marconi, modelo MA 933, composto por uma célula de carga com capacidade nominal de 20 kg, acoplada na extremidade de um braço mecânico movimentado verticalmente por uma rosca-sem-fim. Uma haste metálica, com diâmetro de 4 mm e com ponteira cônica com semiângulo de 30° e área da base de 0,1256 cm², foi utilizada para penetrar nas amostras.

A velocidade de deslocamento vertical da haste foi de 1,0 cm min⁻¹, até a profundidade de 4,0 cm do anel metálico, com taxa de amostragem de 1 ponto s⁻¹. As leituras foram obtidas por meio de software automatizado de aquisição de dados e armazenados em arquivos de extensão “txt”. Os valores de leitura utilizados para cálculo da resistência do solo à penetração foram provenientes da porção intermediária longitudinal do anel, ou seja, foram desconsiderados 0,01 m do extremo superior e 0,01 m do extremo inferior.

3.6 Amostragem, avaliações e análises de plantas

3.6.1 Produtividade de palhada e acúmulo de C e N

Após a retirada dos animais da área e antes da dessecação (em outubro de 2018 e 2019), foram realizadas amostragens das plantas remanescentes, visando a posterior formação palhada. Para tanto, coletou-se 1 m² da forragem em três pontos representativos dentro de cada parcela experimental, com auxílio de um quadrado de metal (1 m x 1 m) e tesoura de poda, as amostras foram devidamente acondicionadas em sacos de papel identificados. Posteriormente, as amostras foram pesadas e colocadas em estufa de ventilação forçada a 65°C por 72 horas, para determinação da massa seca vegetal, sendo os valores extrapolados para kg ha⁻¹.

Após secagem das amostras, o material vegetal foi moído e encaminhado para análise dos teores de C e N em analisador elementar automático (Modelo

TruSpec™ CHNS, da LECO®), assim determinado o acúmulo desses elementos na palhada.

3.6.2 Teores nutricionais de plantas de soja e palhada

Em cada ano agrícola, quando as plantas de soja se encontravam no estágio de desenvolvimento R₂ (florescimento), dentro de cada parcela foram coletados em 30 plantas, o 3º trifólio totalmente desenvolvido, contados a partir do ápice da planta (Fehr e Caviness, 1977). Os trifólios coletados foram acondicionados em sacos de papel e posteriormente secos em estufa de ventilação forçada a 65°C por 72 horas, em seguida as amostras foram moídas e seguiram para a determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg e S, seguindo metodologia proposta por Malavolta et al. (1997). Foi utilizada a massa seca vegetal da palhada, coletada no mês de outubro de 2018 e 2019 para a do teor nutricional da palhada.

3.7 Produtividade de massa seca de soja e capim-aruaana para silagem

Foram coletadas as plantas de soja e capim aruaana contidas em cinco linhas centrais espaçadas em 0,45 m com 5 m de comprimento por parcela, para tal coleta realizou-se o corte manualmente com auxílio de tesoura de poda. As plantas foram divididas em parte residual da colheita da silagem (da base da planta até 0,15 m de altura, ou seja, altura de colheita da plataforma da colhedora) e em parte aérea ensilada (acima de 0,15 m de altura).

O material vegetal de cada parcela foi pesado e uma amostra representativa foi retirada e colocada em estufa de ventilação forçada de ar a 65°C por 72h para determinação do teor de massa seca de cada fração. O somatório dessas frações resultou na produtividade de massa seca total ensilada sendo extrapoladas para kg ha⁻¹.

Na ocasião da colheita também foram determinadas as variáveis: Estande final de plantas; altura de plantas de soja (ALTP), altura de inserção da primeira vagem (AIPV), número de vagens por planta (NVP) e número de grãos por vagem (NGV) dentro de cada parcela experimental.

3.8 Análise estatística

Os dados coletados foram inicialmente testados quanto à normalidade através do teste Shapiro-Wilk (1965), todos apresentaram distribuição normal ($W \geq 0,90$). Posteriormente, os resultados foram submetidos à análise de variância (teste F) e a comparação entre as médias foram realizadas pelo teste de t LSD ($p \leq 0,05$), utilizando o software AgroEstat® (BARBOSA e MALDONADO JUNIOR, 2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Atributos físicos do solo

Na Tabela 1 são apresentados os valores de p do teste F para os atributos físicos do solo. Considerando o nível de significância de 5%, verificou-se efeito da interação dos fatores testados para Ma na camada de 0,0-0,05 m, para DS na camada de 0,10-0,20 m e para DS e PT na camada de 0,20-0,40 m. Efeito isolado do fator Ano foi observado para DS na camada 0,0-0,05 m, para PT, Ma, Mi e DMG na camada 0,05-0,10 m, para PT e Ma na camada de 0,10-0,20 m, e PT, Ma e Mi na camada de 0,20-0,40 m. Já o fator Histórico de consórcio influenciou significativamente a DS e Ma na camada 0,0-0,05 m, o DMG na camada 0,05-0,10 m, a Ma na camada 0,10-0,20 m, e a DS, DMG e RP na camada de 0,20-0,40 m.

Tabela 1 – Análise de variância, com os valores de p do teste F ($p \leq 0,05$), para os atributos físicos do solo, avaliados nas camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m

Fator de variação	DS	PT	Ma	Mi	DMP	DMG	IEA	RP
<i>Camada 0,0 - 0,05 m</i>								
Ano (A)	0,014	0,120	0,808	0,060	0,105	0,124	0,177	0,614
Consórcio (B)	0,022	0,248	0,002	0,167	0,507	0,512	0,595	0,067
A x B	0,330	0,839	0,023	0,133	0,686	0,762	0,680	0,005
CV (%)	4,06	6,06	12,34	7,56	8,91	19,38	2,95	14,29
<i>Camada 0,05 - 0,10 m</i>								
Ano (A)	0,305	0,001	<0,001	0,015	0,229	0,002	0,592	0,015
Consórcio (B)	0,494	0,226	0,748	0,054	0,265	0,001	0,072	0,703
A x B	0,060	0,640	0,805	0,668	0,810	0,064	0,731	0,056
CV (%)	3,57	5,37	16,48	5,02	11,64	12,24	1,81	16,88
<i>Camada 0,10 - 0,20 m</i>								
Ano (A)	0,382	0,001	0,001	0,083	0,729	0,684	0,648	0,038
Consórcio (B)	0,537	0,411	0,001	0,490	0,193	0,212	0,325	0,080
A x B	0,023	0,227	0,175	0,054	0,467	0,286	0,264	0,317
CV (%)	3,43	4,98	6,83	5,04	14,25	23,71	2,68	16,49
<i>Camada 0,20 - 0,40 m</i>								
Ano (A)	0,319	<0,001	0,002	0,001	0,312	0,322	0,087	0,005
Consórcio (B)	0,017	0,763	0,481	0,309	0,117	0,022	0,071	0,002
A x B	0,002	0,026	0,208	0,333	0,903	0,552	0,546	0,866
CV (%)	3,12	3,41	18,29	4,66	16,68	22,88	2,85	12,69

Valores em negrito foram significativos pelo teste F ($p \leq 0,05$). DS= Densidade do solo; PT= Porosidade total; Ma= Macroporosidade; Mi= Microporosidade; DMP= Diâmetro médio ponderado; DMG= Diâmetro médio geométrico; IEA= Índice de estabilidade de agregados; RP= Resistência do solo à penetração.

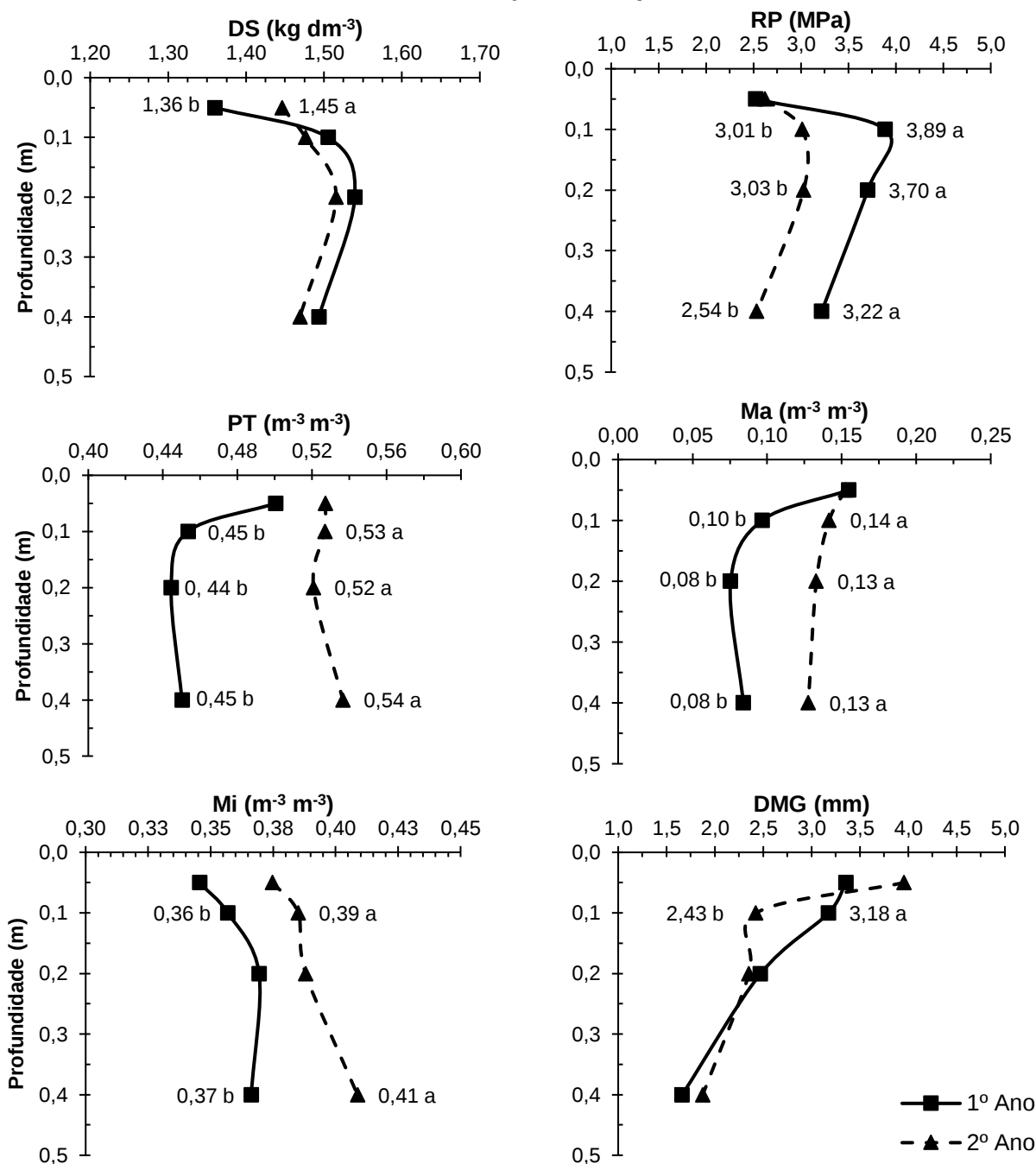
Se tratando do efeito do fator Ano agrícola, a DS apresentou diferença significativa apenas na camada de 0,0-0,05 m, com maior valor de DS no 2º ano em relação ao 1º ano. Apresentando comportamento semelhante, com exceção da camada de 0,0-0,05 m, onde não houve diferença estatística, a RP foi estatisticamente superior no 1º ano de cultivo, nas demais camadas estudadas (Figura 2).

O valor de DS na camada de 0,0-0,05 m aumentou de 1,36 kg dm⁻³ no 1º ano para 1,45 kg dm⁻³ no 2º ano. Por ser na camada mais superficial, esse aumento pode ser atribuído ao tráfego de máquinas na área para as operações de pulverização, adubação e colheita (TORMENA, 2009; BERGAMIN et al., 2010). Já a partir de 0,10 m de profundidade os valores de DS do 1º e 2º ano ficaram muito próximos (Figura 2).

Estudos como o de Carmeis Filho et al. (2016) e Fidalski et al. (2013) mostram que esses valores de DS na camada mais superficial não são necessariamente limitantes para a produtividade agrícola em sistemas integrados de produção, pois esses autores encontraram valores de DS na ordem de 1,5 à 1,6 kg dm⁻³ na camada de 0,0-0,05 m. Entretanto, em um trabalho realizado por Klein (2006), em Latossolo Vermelho, ou seja, mesmo tipo de solo do presente trabalho, foi encontrado valor limitante para a DS de 1,33 kg dm⁻³. Sendo assim, na avaliação desse atributo deve-se levar em consideração qual sistema de produção está inserido sob o solo, para assim definir se os valores de DS são críticos ou não ao sistema.

Contudo, o aumento da DS pode não refletir significativamente no rendimento da cultura, uma vez que os efeitos das alterações na estrutura do solo são difíceis de serem mensurados (KLEIN, 2006), logo, o sistema de produção em que a cultura está inserida pode mitigar os efeitos negativos do aumento da densidade do solo, visto que esse atributo, junto com a porosidade e água do solo são características importantes para avaliar sistemas de ILP (MARCHÃO et al., 2007).

Figura 2 – Atributos físicos do solo avaliados nas camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, no primeiro e segundo ano de avaliação do experimento



Médias seguidas por letras diferentes, no eixo das abscissas, apresentam diferença significativa pelo teste t LDS ($p \leq 0,05$). 1º ano: outubro de 2018; 2º ano: outubro de 2019.

De maneira geral, a RP apresentou valores relativamente elevados, tanto no 1º ano quanto no 2º, quando comparados aos valores encontrados por Sereia (2017), que em um estudo na mesma área observou valores de RP variando de 1,14 a 3,55 MPa. Entretanto, cabe ressaltar que, a formação e posterior decomposição das raízes das culturas antecessoras, que é um processo lento, podem reduzir a RP

do solo, devido a formação de bioporos que melhoram a estruturação do solo e favorecem o crescimento radicular (DHALIWAL e KUMAR, 2021; PELLEGRINI et al., 2016; CALONEGO e ROSOLEM, 2010). Nesse sentido, é indiscutível a importância do aporte de palhada nos sistemas integrados de produção agropecuária, visto que, a longo prazo esse mecanismo pode reduzir em 34 e 35% a DS e RP, respectivamente, quando comparado a um sistema de produção convencional (DHALIWAL e KUMAR, 2021).

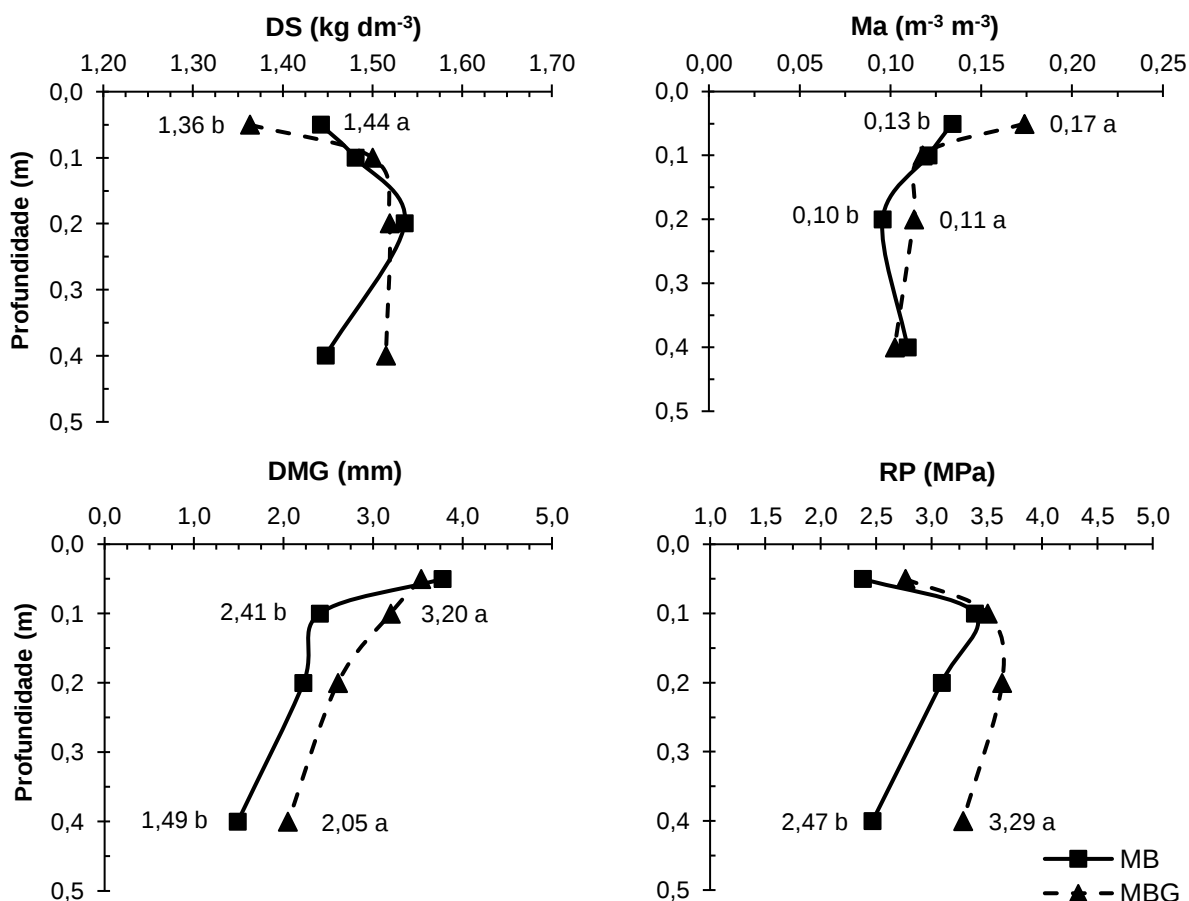
A PT, Ma e Mi apresentaram maiores valores no 2º ano agrícola, em todas as camadas de solo avaliadas, todavia, na camada de 0,0-0,05 m para PT e Ma e nas camadas de 0,0-0,05 e 0,10-0,20 m para a Mi não houve diferença significativa entre os anos agrícolas. O DMG apresentou diferença significativa na camada de 0,05-0,10 m, com valor superior estatisticamente no 1º ano agrícola (Figura 2).

A porosidade total do solo reflete a qualidade estrutural de um solo, uma vez que esse atributo demonstra se há condições favoráveis ou desfavoráveis ao desenvolvimento radicular no perfil do solo, sendo assim, volume de Ma abaixo de $10 \text{ m}^{-3} \text{ m}^{-3}$ para solos argilosos pode ser considerado limitante ao crescimento de raízes, pois reduz a oxigenação e infiltração de água ao passo em que aumenta o volume de Mi no solo (REYNOLDS et al., 2002; BENGOUGH et al., 2011; CHEN et al., 2014) . Portanto, boa condição de macroporosidade ao longo do perfil do solo é o caminho para menor resistência ao crescimento radicular (CALONEGO et al., 2017; COLOMBI et al., 2017).

Assim como a porosidade, o tamanho de partículas do solo influencia na estruturação do solo, sendo assim, o DMG é uma característica fundamental que reflete as condições de estabilidade de agregados no solo, pois este atributo representa o tamanho de classe de agregado de maior ocorrência, que por sua vez, tem influência sobre o crescimento de raiz, acúmulo e infiltração de água e estoque de carbono no solo (CASTRO FILHO et al., 1998; RABOT et al., 2018).

Quanto ao efeito do histórico de consórcio, foi observado que houve menor DS no histórico de consórcio MBG, na camada de 0,0-0,05 m. Além disso, o histórico de consórcio MBG proporcionou maior volume de Ma nas camadas de 0,0-0,05 m e 0,10-0,20 m, maior valor de DMG nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, entretanto, a RP na camada de 0,20-0,40 m foi significativamente superior em relação ao consórcio MB (Figura 3).

Figura 3 – Atributos físicos do solo avaliados nas camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, em função dos históricos de consórcio de milho + braquiária (MB) e milho + braquiária + guandu (MBG)



De acordo com os dados da Figura 3 fica evidente que até na profundidade de 0,10 m, o sistema de cultivo MBG proporcionou melhores condições de compactação, porosidade e agregação do solo, quando comparado ao histórico de consórcio MB, além do mais, na camada de 0,20-0,40 m foi possível observar resultados positivos de DS e agregação do solo. Contudo, houve ainda maior valor de resistência do solo à penetração no histórico de consórcio MBG nessa camada, porém, isso não significa necessariamente uma degradação física do solo, haja vista resultados positivos desse consórcio em outros atributos físicos.

Sendo assim, é desejável ter uma boa correlação entre esses atributos, já que, eles interferem diretamente na agregação, compactação e porosidade do solo, que são características que influenciam a qualidade física do solo (CARMEIS FILHO et al., 2016; CALONEGO et al., 2017).

Nesse contexto, vale a pena ressaltar que a estabilidade de agregado apresentou valores satisfatórios tanto no histórico de consórcio de MB quanto no MBG, nos dois anos agrícolas avaliados, com médias variando de 89,90 % na camada mais profunda à 95,90 na camada mais superficial. Isso, possivelmente, se deve ao fato do aporte de resíduos vegetais no solo nos dois sistemas integrados de produção (GARCIA et al., 2013; BORGES et al., 2019). A manutenção da cobertura do solo leva ao acúmulo de matéria orgânica e aumento da atividade microbiana, favorecendo a interação da atividade microbiológica e estrutura do solo (LOSS et al., 2014, 2017; MELO et al., 2019).

No entanto, em um estudo avaliando a dinâmica das frações de carbono orgânico e agregação do solo durante 23 anos em SPD, Ferreira et al. (2020) verificaram que a redução dos agregados biogênicos ao longo do tempo indicou que o plantio direto afetou negativamente a qualidade da estrutura do solo, inferindo que, a redução desses agregados indica uma diminuição na atividade biológica do solo. Portanto, devemos nos atentar para o fato de que mesmo em sistemas conservacionistas consolidados, porém manejados incorretamente, pode haver redução da biodiversidade dos sistemas a longo prazo, prejudicando as características microbiológicas e consequentemente a qualidade física do solo.

A interação significativa de ano e histórico de consórcio para a densidade do solo revelou que, na camada de 0,10-0,20 m, houve maior valor dessa variável logo no 1º ano de cultivo após o consórcio de MB, enquanto na camada de 0,20-0,40 m, a DS foi superior no 2º ano de cultivo de soja + capim-aruana após o consórcio de MBG (Tabela 2).

Tabela 2 – Desdobramento da interação ano x histórico de consórcio para a densidade do solo (kg dm^{-3}), nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m

	Milho + Braquiária	Milho + Braquiária + Feijão-guandu
<i>Camada 0,10 - 0,20 m</i>		
1º ano	1,58 aA	1,50 aB
2º ano	1,49 bA	1,54 aA
<i>Camada 0,20 - 0,40 m</i>		
1º ano	1,51 aA	1,48 bA
2º ano	1,39 bB	1,55 aA

Médias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo teste t LSD ($p \leq 0,05$). Letras minúsculas nas colunas comparam os anos agrícolas e letras maiúsculas nas linhas comparam o histórico de consórcio. 1º ano: outubro de 2018; 2º ano: outubro de 2019.

Diante disso, observa-se que no consórcio de MB a DS reduziu ao logo do tempo, enquanto no consórcio MBG houve aumento. Em camadas de solo mais profundas, os benefícios dos SIPAs quanto à densidade do solo são ainda mais proeminentes a longo prazo, como revela o estudo de Calonego et al. (2017), que observaram uma redução da densidade do solo até 0,60 m de profundidade em função das melhores condições de estrutura do solo e aumento da macroporosidade promovida por culturas de cobertura ao longo de 12 anos.

Sendo assim, em SIPAs, a redução da densidade do solo em camadas subsuperficiais do solo, dependerá do constante aporte de resíduo vegetal ao longo do perfil do solo, que na grande maioria das vezes é fornecido pelas raízes de plantas forrageiras, como braquiárias (CALONEGO et al., 2017; CALONEGO e ROSOLEM, 2010; DHALIWAL e KUMAR, 2021).

4.2 Atributos químicos do solo

A análise de variância para os resultados de fertilidade do solo revelou interação significativa entre os fatores testados ($p < 0,05$) para CO na camada 0,05-0,10 m, para P, SB e S na camada 0,10-0,20 m, e para CO, H+Al e V na camada 0,20-0,40 m. O fator ano apresentou efeito isolado para os atributos S na camada 0,0-0,05 m, para P, K, SB e CTC na camada 0,10-0,20 m, e para P e K na camada de 0,20 a 0,40 m. Já o fator histórico de consórcio resultou em diferenças significativas para Ca, Mg, SB, CTC e V na camada 0,0-0,05 m, para P, Ca, SB e S na camada de 0,10-0,20 m, e para Mg e SB na última camada de 0,20-0,40 m (Tabela 3).

Na Figura 4 é possível observar que na camada de 0,20-0,40 m, o 2º ano agrícola conferiu um aumento significativo no teor de P disponível quando comparado ao 1º ano. Diante disso, pode-se atribuir esse fato à presença da braquiária no sistema de produção, pois ela tem alta capacidade de crescimento de raiz em profundidade, podendo influenciar na disponibilidade de P em camadas mais profundas do solo devido a exsudação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular pelas raízes que reduzem a sorção de P pelos colóides do solo (PAVINATO e ROSOLEM, 2008; MERLIN et al., 2013; BAPTISTELLA et al., 2020).

Tabela 3 – Análise de variância, com os valores de p do teste F ($p \leq 0,05$), para as propriedades químicas do solo, avaliadas nas camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m

Fator de variação	pH	CO	P	H+Al	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	CTC _{pH7}	V	S
<i>Camada 0,0 - 0,05 m</i>											
Ano (A)	0,920	0,731	0,789	0,795	0,697	0,112	0,408	0,252	0,157	0,619	0,018
Consórcio (B)	0,091	0,961	0,407	0,085	0,893	0,001	0,006	0,002	0,021	0,008	0,165
A x B	0,510	0,187	0,508	0,238	0,111	0,120	0,640	0,215	0,744	0,202	0,189
CV (%)	4,80	13,00	15,18	15,80	23,32	18,11	22,47	18,93	8,96	15,28	18,71
<i>Camada 0,05 - 0,10 m</i>											
Ano (A)	0,106	0,836	0,387	0,586	0,079	0,194	0,441	0,344	0,660	0,397	0,780
Consórcio (B)	0,066	0,756	0,635	0,143	0,730	0,073	0,493	0,149	0,559	0,132	0,064
A x B	0,553	0,008	0,271	0,821	0,100	0,886	0,577	0,922	0,785	0,839	0,215
CV (%)	3,92	5,44	14,79	14,34	21,16	24,14	22,79	20,12	4,90	20,86	24,76
<i>Camada 0,10 - 0,20 m</i>											
Ano (A)	0,063	0,170	0,001	0,116	0,010	0,057	0,275	0,022	0,001	0,354	0,299
Consórcio (B)	0,124	0,141	0,010	0,183	0,552	0,033	0,221	0,032	0,467	0,052	0,033
A x B	0,936	0,346	0,018	0,782	0,850	0,107	0,065	0,045	0,074	0,195	0,049
CV (%)	3,30	5,12	11,60	11,49	23,18	26,21	20,74	17,74	5,93	17,37	24,57
<i>Camada 0,20 - 0,40 m</i>											
Ano (A)	0,087	0,051	0,003	0,448	0,001	0,942	0,287	0,410	0,136	0,759	0,400
Consórcio (B)	0,147	0,793	0,449	0,869	0,855	0,083	0,043	0,009	0,174	0,121	0,097
A x B	0,872	0,005	0,793	0,029	0,644	0,053	0,301	0,516	0,141	0,036	0,221
CV (%)	4,67	4,19	16,08	10,51	22,02	21,14	25,27	18,61	6,64	18,83	16,87

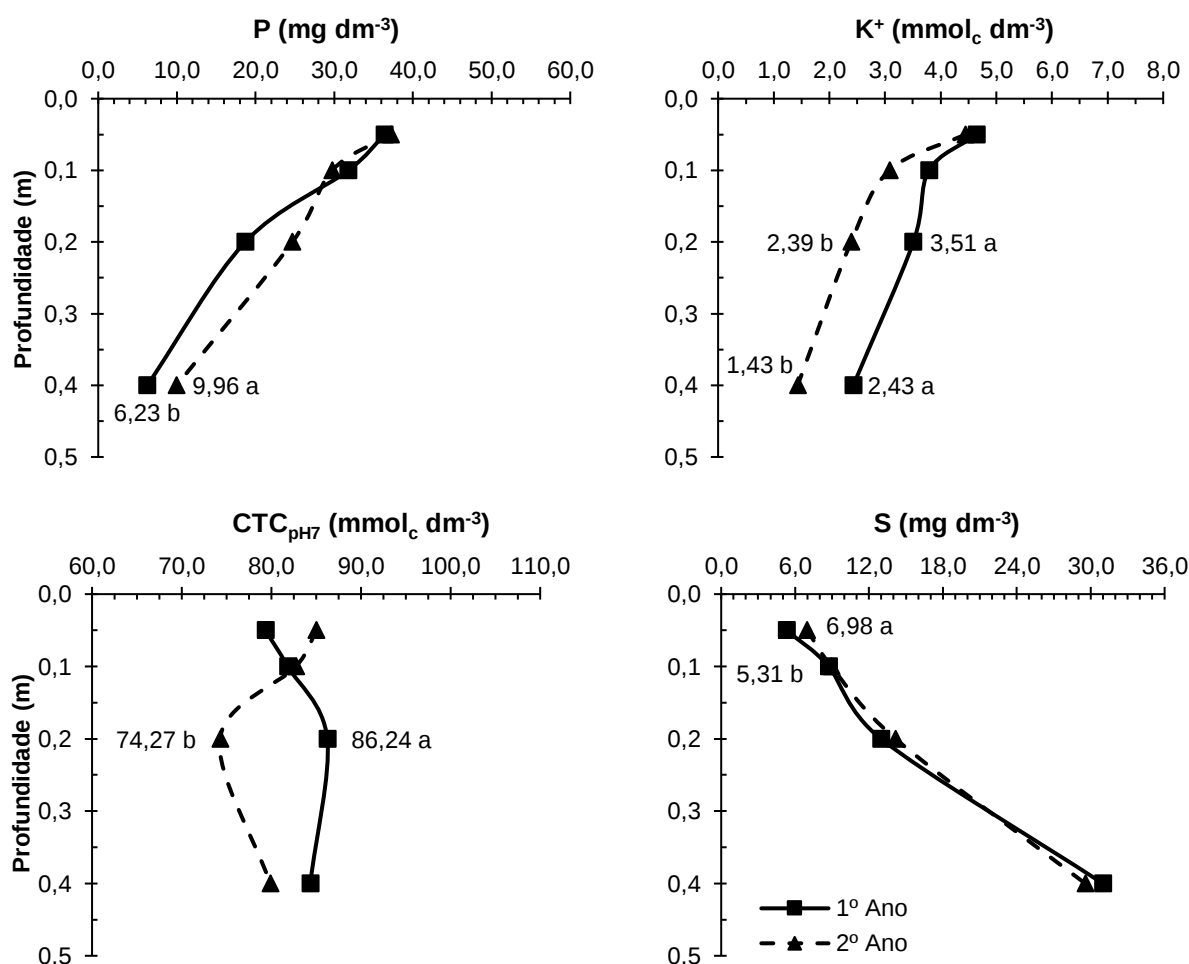
Valores em negrito foram significativos pelo teste F ($p \leq 0,05$). pH= Potencial hidrogeniônico; CO= Carbono Orgânico; P= Fósforo; H+Al= Acidez potencial; K⁺= Potássio; Ca²⁺= Cálcio; Mg²⁺= Magnésio; SB= Soma de bases; CTC_{pH7}= Capacidade de troca de cátions à pH 7; V= Saturação de bases; S= Enxofre.

O comportamento do P verificado nesse estudo vai de encontro ao observado por Varela et al. (2017), que encontraram maiores efeitos dos resíduos das culturas de coberturas, como a braquiária, sob a dinâmica do P, na implantação do sistema de plantio direto. Contudo, efeitos ainda mais significativos podem ser observados a longo prazo nesses sistemas de cultivo (SOUSA et al., 2017; WITHERS et al., 2018; PAVINATO et al., 2020).

Similar ao teor de P, porém na camada de 0,0-0,05 m, o teor de S também foi estatisticamente superior no 2º ano agrícola, e como já esperado o teor aumentou em profundidade, devido sua alta mobilidade no solo. Entretanto chama atenção que na camada mais superficial o teor desse nutriente foi muito inferior ao encontrado por Sereia (2017) e Cruz (2020) em estudos realizados na mesma área, que

encontraram teores de S em torno de 15 mg dm^{-3} na camada de 0,0-0,05 m. Vale ressaltar que em todos os anos agrícolas foi fornecido fósforo ao solo através da adubação de base das culturas, e, portanto, devido a maior força de adsorção do fosfato em relação ao sulfato, ocorre aumento na concentração de P nas camadas superficiais, podendo promover maior dessorção do S (CRUZ, 2020; GEELHOED et al., 1997; MALAVOLTA, 2006).

Figura 4 – Atributos químicos do solo avaliados nas camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, no primeiro e segundo ano de avaliação do experimento



Médias seguidas por letras diferentes, no eixo das abscissas, apresentam diferença significativa pelo teste t LDS ($p \leq 0,05$). 1º ano: outubro de 2018; 2º ano: outubro de 2019.

Para o teor de K foi observado redução significativa no 2º ano de cultivo de soja + capim-arua, tanto na camada de 0,10-0,20 m quanto na camada de 0,20-0,40 m (Figura 4). Em função da colheita para a produção de silagem, o K é um dos nutrientes com alta taxa de exportação pelas culturas, ou seja, há menor ciclagem deste nutriente devido menor quantidade de restos culturais após a colheita, com

isso, é de se esperar que ao longo dos cultivos haja redução no teor, sendo ainda maior em sistemas de produção sem plantas de cobertura no solo.

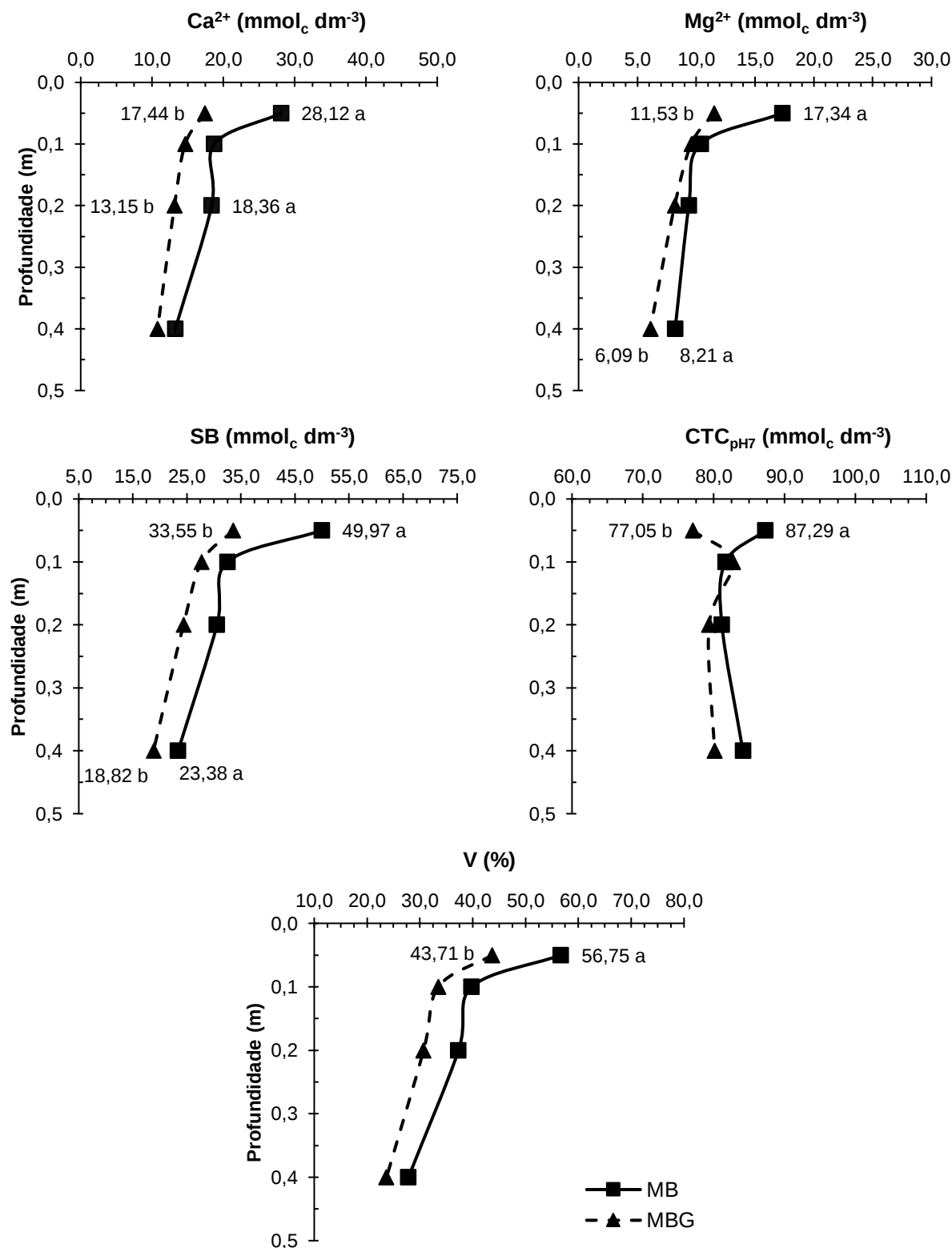
Nesse sentido, em sistemas de produção desse tipo, se torna indispensável o uso de plantas de cobertura, especialmente gramíneas, para a manutenção de resíduos vegetais, visando aumentar principalmente a ciclagem do K que é acumulado em grande quantidade e tem alta taxa de liberação pelos resíduos (PACHECO et al., 2013; MALUF et al., 2015; PARIZ et al., 2020). Corroborando, Calonego et al. (2005, 2012) trabalhando com plantas de cobertura, evidenciaram que à medida que a planta dessecada entra em senescência com presença de chuvas, libera rapidamente o K, que, por sua vez, é retornado ao solo.

Sofrendo influência do menor teor de K e ainda do Ca, a CTC_{pH7} também foi significativamente menor no 2º ano agrícola, na camada de 0,10-0,20 m (Figura 4). Contudo, esses valores podem ser reflexo da maior produção de silagem nesse ano agrícola, havendo maior extração dos nutrientes. Nesse sentido, é importante ressaltar que a quantidade do material vegetal na superfície do solo é fundamental para o aporte de bases no solo, dessa forma a CTC é influenciada devido forte correlação com o conteúdo e qualidade do resíduo vegetal (BRADY e WEIL, 2008; MEIMAROGLOU e MOUZAKIS, 2019).

De maneira geral, maiores teores de Ca e Mg foram observados no histórico de consórcio MB, principalmente na camada de 0,0-0,05 m, corroborando Cruz (2020), que encontrou resultado semelhante nos anos de 2016 e 2017, em estudo realizado no mesmo local. Seguindo o mesmo comportamento, as variáveis SB, CTC_{pH7} e V também apresentaram valores superiores no consórcio MB (Figura 5).

Os altos teores de Ca e Mg na camada superficial refletiram diretamente nos maiores valores de SB, CTC_{pH7} e V na camada de 0,0-0,05 m. De acordo com Amaral et al. (2004) e Merlin et al. (2013), a manutenção dos resíduos de plantas de cobertura na superfície do solo em sistemas integrados proporciona a liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular durante o processo de decomposição, potencializando a ação da calagem superficial nesse sistema.

Figura 5 – Atributos químicos do solo avaliados nas camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, em função dos históricos de consórcio de milho + braquiária (MB) e milho + braquiária + guandu (MBG)



Médias seguidas por letras diferentes, no eixo das abscissas, apresentam diferença significativa pelo teste t LDS ($p \leq 0,05$).

Nesse sentido, a mineralização dos resíduos vegetais, associada a calagem realizada nos sistemas de produção em setembro de 2016, pode ter proporcionado aumento na concentração de cátions na camada superficial do solo. Por outro lado, é possível que também tenha ocorrido menor exportação de nutrientes na área sob o histórico de consórcio MB, visto que houve menor produção de palhada e silagem, justificando assim os maiores valores observados para o Ca, Mg, SB, CTC_{pH7} e V nessa área.

O aumento da concentração de ácidos orgânicos, devido a manutenção da cobertura do solo, além de contribuir para a neutralização do alumínio tóxico, pode aumentar a mobilidade de nutrientes no perfil do solo (AMARAL et al., 2004), dessa forma, favorece o aumento no teor de bases no solo em maiores profundidade, como observado para o Ca e Mg no histórico de consórcio MB (Figura 5). Contudo, vale ressaltar que a presença do feijão-guandu no histórico de consórcio MBG pode ter acelerado a mineralização da matéria orgânica, disponibilizando rapidamente os nutrientes e com isso houve aumento da exportação desses nutrientes pelas culturas, dessa forma menores teores de bases no solo foram observados nesse histórico de consórcio.

Muitos benefícios nas propriedades químicas do solo com a presença da braquiária em consórcio e rotação de culturas são citados em trabalhos como o de Crusciol et al. (2015), que evidenciaram aumento significativo nos valores de P, K, Ca, Mg e CTC em área com cultivo consorciado de milho e braquiária, e com isso, promovendo incremento médio de 15% na produtividade da cultura da soja em sucessão. Na presente pesquisa, foi observado boas condições de fertilidade do solo no histórico de consórcio MB, ou seja, na ausência do feijão-guandu, isso implica que no histórico de consórcio MBG houve maior exportação dos nutrientes do solo, dado o aumento significativo na produtividade de massa seca do capim-aruaana e de silagem em área sob esse consórcio (Tabela 12).

A interação significativa (ano x histórico de consórcio) para o teor de CO no solo na camada de 0,05-0,10 m, mostrou que houve um decréscimo significativo no 2º ano de cultivo na área do consórcio de MBG, provavelmente devido o menor efeito residual da espécie leguminosa presente no consórcio (KLIEMANN et al., 2006), enquanto na camada de 0,20-0,40 m o 1º ano agrícola apresentou maior teor de CO no consórcio MBG, porém no 2º ano, o teor de CO foi maior no consórcio MB (Tabela 4). Isso implica que, os resíduos da espécie leguminosa no consórcio MBG,

pode ter favorecido a rápida mineralização da matéria orgânica, promovendo menor efeito residual a partir do 2º ano sem o consórcio, e com isso o teor de CO é reduzido, ao contrário da área sob o consórcio de MB, onde a cultura forrageira (braquiária) tem menor taxa de decomposição, persistindo por mais tempo no solo garantindo um aumento gradual do CO.

Tabela 4 – Desdobramento da interação significativa ano x histórico de consórcio para as variáveis carbono orgânico (CO) nas camadas de 0,05-0,10 e 0,20-0,40 m, e fósforo (P) e enxofre (S) na camada de 0,10-0,20 m

	CO		P		S	
	----- (g kg ⁻¹) -----		----- (mg dm ⁻³) -----			
	MB	MBG	MB	MBG	MB	MBG
<i>Camada 0,05 - 0,10 m</i>						
1º ano	16,55 aA	17,98 aA	31,03 aA	32,58 aA	8,21 aA	9,05 aA
2º ano	18,03 aA	16,30 bB	31,63 aA	27,84 aA	7,07 aA	10,82 aA
<i>Camada 0,10 - 0,20 m</i>						
1º ano	14,90 aA	15,95 aA	18,91 bA	18,47 aA	11,74 aA	12,12 bA
2º ano	15,90 aA	16,15 aA	28,41 aA	20,70 aB	9,88 aB	17,42 aA
<i>Camada 0,20 - 0,40 m</i>						
1º ano	13,60 bA	14,63 aA	6,06 aA	6,40 aA	31,89 aA	33,32 aA
2º ano	16,57 aA	14,20 aB	9,62 aA	10,31 aA	26,07 aA	34,47 aA

S

SMédias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo teste t LSD ($p \leq 0,05$). Letras minúsculas nas colunas comparam os anos agrícolas e letras maiúsculas nas linhas comparam o histórico de consórcio. MB: Consórcio de Milho + Braquiária; MBG: Consórcio de Milho + Braquiária + Feijão-Guandu. 1º ano: outubro de 2018; 2º ano: outubro de 2019.

Sendo assim, o aumento nos teores de carbono orgânico no solo está associado à quantidade de resíduo na superfície do solo (SOUSA et al., 2017), bem como a espécie da cultura de cobertura e taxa de decomposição do resíduo vegetal (LEITE et al., 2010; CALONEGO, et al., 2012; COSTA et al., 2014b) e capacidade de produção de raízes da espécie utilizada (CALONEGO e ROSOLEM, 2010; LIANG et al., 2022).

Quanto ao teor de P, na camada de 0,05-0,10 m foi observado maior teor no 2º ano de cultivo no consórcio de MB sendo também superior estatisticamente ao consórcio MBG no referido ano agrícola. O S, por sua vez, na camada de 0,10-0,20 m, apresentou menor teor no 2º ano de cultivo sob o histórico de consórcio MB, além

de ser estatisticamente inferior ao consórcio MBG (Tabela 4). Assim sendo, nota-se que houve redução do teor de S no solo a partir do 2º ano do cultivo de soja + capim-aruaana sob a área com histórico de consórcio MB, enquanto no histórico de consórcio MBG houve aporte de S em profundidade.

A associação do feijão-guandu com a braquiária pode ter contribuído para a maior disponibilidade de S no solo no histórico de consórcio MBG, uma vez que essas culturas de cobertura tem alta capacidade de acúmulo de S nas raízes (SILVA e MONTEIRO, 2010; FARIAS et al., 2015), com rápida liberação desse nutriente pelos resíduos culturais do feijão-guandu (SINGH et al., 2021). Nesse contexto, cabe ressaltar que o S tem alta taxa exportação pela cultura da soja, ou seja, para cada tonelada de grãos produzida são exportados cerca de 43 kg de $S-SO_4^{2-}$ (FLOSS, 2021), reforçando a importância de utilização de sistemas integrados de produção para a melhoria da ciclagem desse nutriente essencial, visto que a matéria orgânica é um importante fonte de S para o solo.

Contudo, dentre outras características o potencial de ciclagem dos nutrientes pelas plantas de cobertura do solo, depende do potencial de produção de fitomassa, da taxa de mineralização e da capacidade de absorção e acúmulo de nutrientes pela espécie utilizada (PARIZ et al., 2011; COSTA et al., 2014b; SOUSA et al., 2017). Nesse sentido, Carneiro et al. (2004) e Eberhardt et al. (2021) constataram que o feijão-guandu aumenta a disponibilidade de P, pois estimula a proliferação de microrganismos que auxiliam na solubilização de fosfato, favorecendo o acúmulo de P no solo. Entretanto, neste estudo, não foi observada essa característica na área com histórico de consórcio com feijão-guandu (Tabela 4), isso, possivelmente, se deve ao fato da rápida mineralização dos resíduos dessa leguminosa, disponibilizando o P que se não for absorvido pelas plantas é fixado nos colóides do solo, logo reduzindo sua disponibilidade ao longo do tempo. No entanto, é importante frisar que os teores de P no solo nas camadas mais profundas estão satisfatórios (RAIJ et al., 1997), sendo assim, o sistema integrado de produção favoreceu a disponibilidade desse nutriente em profundidade.

Com relação à interação dos fatores para a acidez potencial (H+Al), na camada de 0,20-0,40 m, houve diferença entre os anos de cultivo no consórcio MBG, com o menor valor desse atributo sendo observado no 2º ano de cultivo sob o histórico de consórcio MBG (Tabela 5). Sendo assim, nota-se que em camadas mais profundas houve uma tendência de aumento da acidez ao longo dos cultivos, no

histórico de consórcio MB, por outro lado, no histórico de consórcio MBG houve redução da H+Al. Nesse sentido, em sistemas de cultivos integrados para a produção de silagem há elevada extração dos nutrientes, fazendo com que haja a liberação dos sítios de adsorção, que conseqüentemente pode aumentar a concentração de íons H^+ e assim tornando o solo sujeito a acidificação.

Tabela 5 – Desdobramento da interação significativa ano x histórico de consórcio para as variáveis acidez potencial (H+Al) na camada de 0,20-0,40 m, soma de bases (SB) na camada de 0,10-20 m e saturação por bases (V) na camada de 0,20-0,40 m

	H+Al		SB		V	
	----- mmol _c dm ⁻³ -----				----- % -----	
	MB	MBG	MB	MBG	MB	MBG
<i>Camada 0,10 - 0,20 m</i>						
1º ano	52,80 aA	58,05 aA	36,74 aA	24,88 aB	40,83 aA	30,08 aA
2º ano	48,39 aA	51,91 aA	24,39 bA	23,87 aA	33,80 aA	31,33 aA
<i>Camada 0,20 - 0,40 m</i>						
1º ano	57,84 aA	66,72 aA	26,31 aA	17,82 aA	31,21 aA	21,09 aB
2º ano	63,64 aA	55,85 bA	20,46 aA	19,82 aA	24,48 aA	26,29 aA

Médias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo teste t LSD ($p \leq 0,05$). Letras minúsculas nas colunas comparam os anos agrícolas e letras maiúsculas nas linhas comparam o histórico de consórcio. MB: Consórcio de Milho + Braquiária; MBG: Consórcio de Milho + Braquiária + Feijão-Guandu. 1º ano: outubro de 2018; 2º ano: outubro de 2019.

Logo, utilizar sistemas de produção que favorecem a ciclagem de nutrientes, é uma estratégia para atenuar essa característica de aumento da acidez em profundidade. Uma vez que, sistemas produtivos com aporte de resíduo vegetal, podem aumentar a saturação da CTC do solo pelo Ca, Mg e K e ainda favorecer a complexação dos H^+ e Al^{3+} livres com compostos orgânicos aniônicos dos resíduos, reduzindo assim a acidez potencial (PAVINATO e ROSOLEM, 2008).

Tanto a SB, na camada de 0,10-0,20 m, quanto a V, na camada de 0,20-0,40 m apresentaram maiores valores na área com histórico de consórcio MB (Tabela 5), muito em função dos elevados teores de Ca e Mg nesse mesmo histórico de consórcio (Figura 3). Diante deste fato, é possível inferir que após a conversão dos sistemas de consórcio MB e MBG em cultivo consorciado de soja + capim-arua, maior persistência de cátions trocáveis na solução do solo foi encontrada na área com histórico de consórcio de milho + braquiária.

A análise de variância para os estoques de Carbono (C) e Nitrogênio (N) no solo mostrou que houve significância pelo teste F ($p \leq 0,05$) apenas para o estoque de N, no fator ano agrícola, em todas as camadas de solo avaliadas (Tabela 6). Foi observado que o estoque de N no solo, no 2º ano agrícola, foi estatisticamente superior ao 1º ano, em todas as camadas de solo avaliadas. Isso se deve ao fato da ciclagem desse nutriente no solo ao longo dos anos de cultivo, através mineralização dos resíduos oriundos dos consórcios, especialmente com a presença do feijão-guandu no sistema, que é uma leguminosa caracterizada pelo fornecimento de N ao solo.

Vale ressaltar que houve pastejo por cordeiro na área experimental durante o inverno, e isso pode favorecer o acúmulo de N, através de fezes e urinas dos animais, e de C no solo dependendo da intensidade de pastejo (ALVES et al., 2020; FARIAS FILHO et al., 2019), além disso na safra de 2016/2017 houve o cultivo de soja + capim-aruaana, que também pode ter contribuído para o aumento do estoque de N ao longo dos anos, devido a presença da leguminosa. Isso implica que além da quantidade, se deve levar em consideração a qualidade dos resíduos vegetais quanto ao teor de N, a fim de aumentar a eficiência do substrato utilizado pela microbiota do solo e assim contribuir para o acúmulo de C e N (COTRUFO et al., 2015; VELOSO et al., 2019).

Embora tenha sido observado aumento do estoque de N ao longo do tempo, não houve diferença entre os históricos de consórcio para esse atributo, mesmo com uma cultura leguminosa presente em um dos históricos de consórcio (MBG), contudo, ambos os sistemas de produção são eficientes no aporte de C e N ao solo. Nesse sentido, Alves et al. (2020) estudando os efeitos da rotação de culturas e pastejo de ovinos no estoque de C e N no solo, observaram que a cada 10 kg de N fornecidos ao solo pela biomassa vegetal houve o aumento de 0,53 t ha⁻¹ no estoque de C, em monocultivo de soja, enquanto no sistema de rotação de cultura esse aumento foi 0,30 t ha⁻¹. Indicando que em SIPA com alto fornecimento de N, aumenta a eficiência dos microrganismos na estabilização do C no solo.

Tabela 6 – Estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo e valores de P do teste F nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, em função do ano agrícola e histórico de consórcio em área cultivada com o consórcio de soja e capim-aruaana

	Estoque de C ----- kg ha ⁻¹ -----	Estoque de N
<i>Camada 0,0 - 0,05 m</i>		
1º ano	12,87	0,99 b
2º ano	12,68	1,28 a
<i>Valores de p</i>		
Ano (A)	0,786	0,032
Consórcio (B)	0,885	0,333
A x B	0,567	0,584
CV (%)	10,70	19,83
<i>Camada 0,05 - 0,10 m</i>		
1º ano	12,91	0,99 b
2º ano	12,54	1,21 a
<i>Valores de p</i>		
Ano (A)	0,299	0,001
Consórcio (B)	0,784	0,355
A x B	0,167	0,562
CV (%)	5,27	6,81
<i>Camada 0,10 - 0,20 m</i>		
1º ano	23,50	1,76 b
2º ano	24,50	2,43 a
<i>Valores de p</i>		
Ano (A)	0,349	<0,001
Consórcio (B)	0,083	0,096
A x B	0,472	0,189
CV (%)	5,09	5,07
<i>Camada 0,20 - 0,40 m</i>		
1º ano	41,87	2,96 b
2º ano	45,43	4,56 a
<i>Valores de p</i>		
Ano (A)	0,107	0,001
Consórcio (B)	0,926	0,303
A x B	0,271	0,519
CV (%)	9,12	14,32

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste t LSD ($p \leq 0,05$). Valores em negrito foram significativos pelo teste F ($p \leq 0,05$). 1º ano: outubro de 2018; 2º ano: outubro de 2019.

Os estoques de C e N do solo são em função das entradas de C e N, da composição química dos tecidos vegetais e da decomposição (CARVALHO et al., 2022), dessa forma, culturas de cobertura com alto desenvolvimento do sistema

radicular favorece o acúmulo de C em ao longo do perfil do solo (RAMOS et al., 2021). Em vista disso, gramíneas tropicais, como *U. brizantha* e *M. maximus* podem ser recomendadas como plantas de cobertura para melhorar alguns atributos do solo pela ação de suas raízes, sendo tão importante quanto a produção de cobertura do solo (ROSOLEM et al., 2016).

Portanto, cultivos agrícolas baseados nos princípios dos SIPAs são indispensáveis para o aporte de C no solo, como demonstrado nos resultados de um estudo conduzido por Carvalho et al. (2009) na região do Cerrado em áreas de SPD, em que a taxa de acúmulo de C com a adoção de SIPA sob SPD pode variar de 800 a 2.800 kg ha⁻¹ ano⁻¹. Além do mais, Sant-Anna et al. (2017) avaliando as alterações do C orgânico do solo durante 22 anos de pastagens, culturas agrícolas ou SIPA no Cerrado brasileiro, demonstraram que no SIPA o aumento de C no solo foi de aproximadamente 16 Mg C ha⁻¹.

4.3 Acúmulo de C e N na palhada sobre o solo

Na Tabela 7 estão descritos os dados referentes à palhada do sistema de produção, onde foi observado que o acúmulo de N e relação C/N apresentaram efeito significativo para ano e histórico de consórcio, enquanto o acúmulo de C e produtividade de palhada apresentaram interação significativa, sendo comentada na Tabela 8. Diante dos dados obtidos, fica notório que houve uma redução significativa no teor de N na palhada, contudo há de se considerar que na palhada avaliada no 1º ano havia resíduos de aveia preta sobressemeada no inverno, enquanto na palhada do 2º ano havia apenas a presença de capim-aruaana, podendo assim ter influência no acúmulo desse nutriente na palhada. Por outro lado, quando comparado o histórico de consórcio, aconteceu o que já se esperava, ou seja, houve maior acúmulo de N na palhada sobre o histórico de consórcio MBG, certamente devido ao maior aporte desse nutriente pela presença do feijão-guandu em consórcio.

De acordo com Carvalho et al. (2022), em sistemas agrícolas, os resíduos de culturas são a principal fonte de C do solo. Logo, sua composição química afeta a dinâmica de C e N do solo e influencia fortemente a taxa de decomposição e formação de biomassa microbiana e seus subprodutos (ANDERSON, 2017; SCHMATZ et al., 2017). Com isso, plantas com maior capacidade de acúmulo de C e N influenciam diretamente na disponibilidade dos nutrientes no solo.

Tabela 7 – Acúmulo de Carbono (C) e Nitrogênio (N), Relação C/N, Produtividade de palhada e valores de p do teste F, em função do ano agrícola e histórico de consórcio em área cultivada com o consórcio de soja e capim-aruanã em Botucatu, SP

	Acúmulo de C -----	Acúmulo de N -----	Produtividade de palhada -----	Relação C/N
	kg ha ⁻¹			
Ano				
1º	1.043 b	51,5 a	2.523 b	21,0 b
2º	2.068 a	43,9 b	4.721 a	48,1 a
Hist. consórcio				
MB	1.342 b	36,9 b	3.100 b	38,2 a
MBG	1.768 a	58,5 a	4.144 a	30,9 b
Ano (A)	<0,0001	0,0058	<0,0001	<0,0001
Consórcio (B)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
A x B	<0,0001	0,4003	0,0002	0,9399
CV (%)	7,08	8,87	7,58	5,69

Valores em negrito foram significativos pelo teste F ($p \leq 0,05$). Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste t LSD ($p \leq 0,05$).

A relação C/N na palhada foi significativamente maior no 2º ano, bem como foi superior no histórico de consórcio MB. Nitidamente, a relação C/N foi maior devido aumento significativo no acúmulo de C e produtividade da palhada (Tabela 7). Sendo assim, esse elevado aumento da relação C/N em função do maior acúmulo de C e redução no teor de N na palha, pode retardar o processo de mineralização e consequente liberação dos nutrientes ao solo, uma vez que, a decomposição dos resíduos culturais é diretamente proporcional aos teores de N, como observado por Maluf et al. (2015) e Li et al. (2020) em culturas leguminosas e não leguminosas. Além disso, com a quantidade de N na palhada longe do adequado para o processo de decomposição, há maior imobilização de nutrientes, reduzindo a disponibilidade para as culturas (MANGARAVITE et al., 2014). Por outro lado, a adição de resíduos com alta relação C/N intensifica a degradação do C nativo do solo pela ação dos microrganismos em busca de N (TEIXEIRA et al., 2015).

De acordo com estudo de Wang et al. (2015) em condições naturais, resíduos foliares com relação C/N mais próxima de 20 e menor teor de lignina otimizam as condições para os microrganismos no processo de mineralização. Diante disso, é possível inferir que no 1º ano agrícola a mineralização dos resíduos foi otimizada,

devido a relação C/N de 21, especialmente na área com histórico de consórcio MBG, onde houve maior acúmulo de N, reduzindo assim a relação C/N.

O desdobramento da interação significativa (ano x histórico de consórcio), mostrou que no segundo ano agrícola, onde havia o histórico cultivo consorciado de milho, braquiária e feijão-guandu, houve maior acúmulo de C na palhada, isso se deve ao fato da maior produtividade de palhada na área com esse histórico de consórcio no 2º ano agrícola (Tabela 8). A maior produtividade de palhada no 2º ano agrícola pode ter sido influenciada pela menor pressão de pastejo por cordeiros na área experimental, uma vez que a taxa de lotação foi baseada na disponibilidade de forragem. Sendo assim, menor intensidade de pastejo resulta no aumento do resíduo vegetal na superfície do solo, que por sua vez eleva o acúmulo de C, podendo ser incorporado ao solo (ALVES et al., 2020). Além do mais, dependendo da intensidade, o pastejo pelos animais podem estimular a produção de novas folhas, perfilhos e raízes pelas plantas forrageiras (COSTA, et al., 2021a).

Tabela 8 – Desdobramento da interação significativa ano agrícola x histórico de consórcio para o acúmulo de carbono (C) na palhada e produtividade de palhada, em área cultivada com o consórcio de soja e capim-aruana em Botucatu, SP

	Acúmulo de C		Produtividade de palhada	
	----- kg ha ⁻¹ -----			
	MB	MBG	MB	MBG
1º ano	1.019,78 bA	1.066,61 bA	2.403,33 bA	2.643,33 bA
2º ano	1.665,73 aB	2.471,31 aA	4.796,67 aB	5.645,96 aA

Médias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo teste t LSD ($p \leq 0,05$). Letras minúsculas nas colunas comparam os anos agrícolas e letras maiúsculas nas linhas comparam o histórico de consórcio. MB: Consórcio de Milho + Braquiária; MBG: Consórcio de Milho + Braquiária + Feijão-Guandu.

Outro fato que pode ter contribuído para maior produtividade de palhada no 2º ano foi a capacidade de produção de forragem do capim-aruana, como relatado por Costa et al. (2021), que estudando a nutrição e produtividade da soja após o cultivo de forrageiras do gênero *Urochloa* e *Megathyrsus*, encontraram maior produção de palhada para o capim do gênero *Megathyrsus*, alcançando 7.625 kg ha⁻¹ de massa seca contra 6.555 kg ha⁻¹ do capim-marandu.

Ademais, essa forrageira tem alta capacidade de rebrote após intensa desfolha, atribuída ao intenso perfilhamento basal e aéreo, bem como à estabilidade

da população de perfilhos (GIACOMINI et al., 2014). Demonstrando, assim alta capacidade de produção de palhada sobre o solo dessa forrageira tropical, sendo muito útil em SIPAs, visto que, protegem o solo contra erosão, melhorando a qualidade física e gerando resíduos para posterior mineralização e liberação de nutrientes para o solo.

4.4 Concentração de nutrientes na cultura da soja e palhada

No que se refere ao teor nutricional nas folhas de soja, foi observado que, com exceção do S, todos os nutrientes determinados apresentaram efeito significativo para o ano agrícola, obtendo teores estatisticamente superiores no 2º ano agrícola. Por sua vez, o S apresentou efeito significativo para o fator histórico de consórcio, nesse caso, proporcionando maior valor sob área anteriormente cultivada com o consórcio de milho, braquiária e feijão-guandu (Tabela 9), que pode estar relacionado ao efeito residual da decomposição do feijão-guandu, que apresenta alto acúmulo e liberação desse nutriente no solo (FARIAS et al., 2015; SINGH et al., 2021).

De maneira geral, os teores nutricionais nas folhas de soja observados neste estudo, estão próximos aos relatados por Costa et al. (2021) e Crusciol et al. (2015) em cultivo de soja após sistemas de cultivos consorciados com forrageiras tropicais, exceto para o teores de N e K que ficaram bem abaixo. Entretanto, na presente pesquisa a soja foi colhida para ensilagem de planta inteira, ou seja, há maior extração desses nutrientes quando comparado à colheita para produção de grãos (FLOSS, 2021).

Baixos teores de N nas folhas de soja também foram observados por Pariz et al. (2020), principalmente quando o sistema de cultivo anterior era o consórcio de milho e braquiária, sugerindo que sistemas de cultivo sem a inclusão de leguminosas em consórcio ou rotação de culturas ao longo do tempo podem reduzir a disponibilidade de N e consequentemente a absorção pelas culturas.

Quanto ao teor nutricional na palhada, o P, Ca e Mg foram significativos pelo teste F ($p \leq 0,05$) apenas para o fator ano, enquanto o N e o K apresentaram significância apenas para o fator histórico de consórcio (Tabela 10). Foi observado que no 1º ano de cultivo houve maiores teores de P e Ca na palhada, por outro lado, o teor de Mg foi maior no 2º ano de cultivo.

Tabela 9 – Teor de Nitrogênio (N), Fósforo (P), Enxofre (S), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Potássio (K) nas folhas de soja, e valores de p do teste F em função do Ano agrícola e Histórico de consórcio em área cultivada com o consórcio de soja e capim-aruaana no município de Botucatu, SP

	N	P	S	Ca	Mg	K
	----- (g kg ⁻¹) -----					
Ano						
1º	20,04 b	2,56 b	1,45	11,99 b	3,22 b	10,18 b
2º	38,73 a	3,10 a	1,23	13,60 a	4,17 a	14,76 a
Hist. consórcio						
MB	28,81	2,89	1,13 b	12,58	3,78	12,35
MBG	29,96	2,77	1,55 a	13,01	3,61	12,59
	Valores de p					
Ano (A)	<0,0001	0,0002	0,1571	0,0003	<0,0001	0,0002
Consórcio (B)	0,4580	0,2166	0,0171	0,1560	0,2537	0,7551
A x B	0,7013	0,6449	0,2313	0,4830	0,1939	0,1104
CV (%)	10,04	6,11	21,33	4,36	7,32	11,89

Valores em negrito foram significativos pelo teste F ($p \leq 0,05$). Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste t LSD ($p \leq 0,05$).

Os teores de N e K na palhada foram superiores estatisticamente em área com histórico de consórcio de MBG, possivelmente devido maior disponibilidade desse nutriente na área com esse histórico de consórcio, promovido pelos resíduos da cultura leguminosa. Resultado semelhante foi encontrado por Pariz et al., (2020) e Costa et al., (2021b), atribuindo esse fato à grande capacidade de extração de nutrientes do capim-aruaana, sendo liberados ao solo posteriormente, através da mineralização dos resíduos (CALONEGO et al., 2012), demonstrando assim, a importância de pesquisas para subsidiar a geração de conhecimento e tecnologias para aumentar a eficiência dos sistemas de cultivo que incluem pastagem na entressafra semeada em consórcio ou em sucessão a grãos.

Contudo, a eficiência no acúmulo e liberação de nutrientes pelas culturas forrageiras não são suficientes para suprir a exigência nutricional da cultura sucessora, especialmente se for para a produção de silagem, no entanto, podem reduzir a necessidade de adubação da cultura sucessora. Nesse sentido alguns estudos mostram que a adubação nitrogenada e potássica em sistemas integrados promove altos ganhos produtivos com a cultura cultivada na safra de verão (COSTA et al., 2021; MATEUS et al., 2020; JENSEN et al., 2020), além de minimizar os

custos de insumos e impactos ambientais da agricultura (FRANZLUEBBERS, 2007; RUSSELLE et al., 2007).

Tabela 10 – Teor de Nitrogênio (N), Fósforo (P), Enxofre (S), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Potássio (K) na palhada sob o solo, e valores de p do teste F em função do Ano agrícola e Histórico de consórcio em área cultivada com o consórcio de soja e capim-arua no município de Botucatu, SP

	N	P	S	Ca	Mg	K
	----- (g kg ⁻¹) -----					
Ano						
1º	9,07	3,04 a	0,97	4,68 a	2,42 b	15,30
2º	10,63	1,70 b	0,67	4,03 b	2,98 a	16,37
Hist. consórcio						
MB	8,74 b	2,49	0,71	4,30	2,81	14,80 b
MBG	10,96 a	2,24	0,93	4,40	2,59	16,88 a
<i>Valores de p</i>						
Ano (A)	0,0860	0,0002	0,0016	0,0256	0,0142	0,1135
Consórcio (B)	0,0224	0,3103	0,0098	0,6778	0,2715	0,0077
A x B	0,2575	0,1363	0,0572	0,1305	0,1799	0,9436
CV (%)	16,36	19,00	16,43	11,23	13,81	7,68

Valores em negrito foram significativos pelo teste F ($p \leq 0,05$). Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste t LSD ($p \leq 0,05$).

É importante ressaltar que, a quantidade de biomassa e nutrientes acumulados pela palhada depende da época de semeadura da cobertura vegetal, espécie, manejo da adubação, estágio fenológico de dessecação, relações C/N e lignina/N, condições climáticas e tipo de solo (COSTA et al., 2021), influenciando também na liberação desses nutrientes acumulados ao solo. Nesse sentido, é necessário um monitoramento constante da fertilidade do solo, com ênfase na aplicação de calcário, gesso, fósforo e micronutrientes, pois a maior parte da biomassa produzida ao longo do ano nesses SIPAs é exportada via corte das plantas para ensilagem (PARIZ et al., 2020).

4.5 Componentes de produção da soja e produtividade de silagem

Diante da Tabela 11 é possível observar que as variáveis população de plantas, altura de inserção da primeira vagem (AIPV) e número de vagens por planta (NVP) sofreram influência significativa apenas do fator ano agrícola, apresentando maiores médias no 2º ano de cultivo, já a altura de plantas de soja (ALTP) sofreu

influência significativamente tanto do ano agrícola quanto do histórico de consórcio, com maiores valores no 1º ano e no histórico de consórcio MB.

As características da cultura da soja citadas acima são altamente dependentes do potencial genético da cultivar utilizada, sendo assim, adequadas condições de cultivo são indispensáveis para que a cultura possa expressar o máximo possível do seu potencial, refletindo assim em um alto desempenho produtivo. Nesse contexto, os SIPAs têm como um dos principais benefícios, promover ótimas condições para desenvolvimento das culturas utilizadas nas mais diversas modalidades desse sistema, devido, principalmente, à manutenção constante da cobertura do solo, favorecendo a ciclagem de nutrientes e assim, tornando o sistema produtivo por muito mais tempo.

Tabela 11 – População de plantas ha⁻¹, altura de plantas (ALTP), altura de inserção da primeira vagem (AIPV), número de vagens por planta (NVP) e número de grãos por vagem (NGV) na cultura da soja consorciada com capim-aruaana, em função do ano agrícola e histórico de consórcio.

	População plantas ha ⁻¹	ALTP ----- m	AIPV -----	NVP	NGV
Ano					
1º	196.111 b	1,07 a	0,11 b	79,38 b	2,68
2º	229.629 a	1,01 b	0,15 a	97,94 a	2,56
Hist. consórcio					
MB	214.629	1,09 a	0,14	88,64	2,64
MBG	211.111	0,98 b	0,13	90,68	2,61
<i>Valores de p</i>					
Ano (A)	0,0059	0,0312	0,0025	0,0005	0,1109
Consórcio (B)	0,7159	0,0010	0,1999	0,9918	0,7318
A x B	0,2585	0,8082	0,1999	0,9369	0,4040
CV (%)	8,79	4,82	14,93	7,96	5,39

Valores em negrito foram significativos pelo teste F ($p \leq 0,05$). Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste t LSD ($p \leq 0,05$).

Nesse sentido, como foi utilizada a mesma cultivar nos dois anos agrícolas, maior valor para o número de vagens por planta no 2º ano pode estar associado a maior produtividade de palhada nesse ano (Tabela 7), criando um ambiente com menor risco de sofrer por injúrias causadas por estresses bióticos ou abióticos, já que essa característica é sensível à ocorrência de períodos de estresse na planta durante a formação das vagens (FLOSS, 2021). Corroborando, Crusciol et al. (2015) e Costa et al. (2021b) também encontraram maior número de vagens por planta na cultura da soja, após sistemas de cultivo consorciados com forrageiras tropicais.

Quanto à altura de plantas de soja, menor média conferida pelo histórico de consórcio MBG pode ter sofrido influência da competição com o capim-aruaana, visto que as culturas foram semeadas em consórcio e houve maior produtividade de massa seca de capim-aruaana no histórico de consórcio MBG (Tabela 12).

Tabela 12 – Produtividade de massa seca (PMS) de plantas de soja, capim-aruaana e silagem de planta inteira de soja + capim-aruaana em função do ano agrícola e histórico de consórcio

	Soja	Capim-aruaana	Silagem
	----- kg ha ⁻¹ -----		
Ano			
1º	10.207,8 b	1.036,4	11.244,2 b
2º	11.220,5 a	1.019,5	12.240,0 a
Hist. consórcio			
MB	10.513,9	966,3 b	11.480,1
MBG	10.914,5	1.089,7 a	12.004,2
Ano (A)	0,0153	0,6856	0,0218
Consórcio (B)	0,2679	0,0134	0,1792
A x B	0,5794	0,5485	0,6478
CV (%)	6,33	7,82	6,12

Valores em negrito foram significativos pelo teste F ($p \leq 0,05$). Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste t LSD ($p \leq 0,05$).

A produtividade de massa seca de plantas de soja e silagem apresentaram efeito significativo apenas para o ano agrícola, obtendo maior produtividade de massa seca no 2º ano (Tabela 12), certamente, devido a maior população de plantas e número de vagens por plantas de soja nesse ano (Tabela 11). Por sua vez, a produtividade de massa seca do capim-aruaana sofreu influência apenas do histórico de consórcio, com destaque para o histórico MBG que conferiu maior produtividade de matéria seca ao capim-aruaana, demonstrando a boa capacidade de produção e adaptação dessa forrageira em cultivos consorciados.

5 CONCLUSÕES

Os atributos físicos do solo não alcançaram níveis críticos com o cultivo consorciado de soja e capim-aruaana e pastejo por ovinos, após os consórcios de milho + braquiária e milho + braquiária + feijão-guandu. Mantendo baixos níveis de densidade e compactação do solo na camada superficial, especialmente em área com a presença de feijão-guandu em consórcio. A estrutura do solo foi minimamente afetada nos dois anos de cultivo consorciado de milho + capim-aruaana com pastejo por ovinos, conferindo índice de estabilidade acima de 90%.

Os níveis de P, K, Ca e Mg no solo se mantiveram adequados nas camadas superficiais do solo ao longo dos anos, nos dois históricos de consórcio. Por outro lado, houve redução no teor de S no solo, ao longo dos cultivos de soja + capim-aruaana com pastejo por ovinos.

Os SIPAs proporcionaram aumento na produção de palhada sobre o solo, aumentando o acúmulo de carbono e consequentemente a relação C/N ao longo dos anos. Onde havia a presença do feijão-guandu em consórcio, o efeito residual proporcionou maior produção de palhada e acúmulo de C, N e K na palha sobre o solo, nos dois anos agrícolas.

O aumento da produção de palhada do capim-aruaana ao longo dos cultivos proporcionou maior produtividade de massa seca de planta inteira de soja + capim-aruaana para ensilagem no segundo ano.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVES, L. A.; DENARDIN, L. G. de O.; MARTINS, A. P.; BAYER, C.; VELOSO, M. G.; BREMM, C.; CARVALHO, P. C. de F.; MACHADO, D. R.; TIECHER, T. 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. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 203, n. March, p. 104678, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104678>.
- AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F. C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 115–123, 2004.
- AMBROSANO, E. J.; TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. Leguminosas. In: RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Eds.). **Boletim Técnico 100: Recomendação de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico; IAC, 1997. p.187-202.
- ANDERSON, R. L. Improving resource-use-efficiency with no-till and crop diversity. **Renewable Agriculture and Food Systems**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 105–108, 2017.
- ANDERSON, R. L. Increasing corn yield with no-till cropping systems: A case study in South Dakota. **Renewable Agriculture and Food Systems**, [s. l.], v. 31, n. 6, p. 568–573, 2016.
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. de O.; STONE, L. F. **Marco Referencial: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**. Brasília, Brasil: Embrapa, 2011. 2011.
- BAPTISTELLA, J. L. C.; DE ANDRADE, S. A. L.; FAVARIN, J. L.; MAZZAFERA, P. Urochloa in Tropical Agroecosystems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [s. l.], v. 4, p. 119, 2020.
- BARBOSA, J. C.; MALDONADO JUNIOR, W. **AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos**. [S. l.: s. n.], 2015.
- BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of experimental botany**, [s. l.], v. 62, n. 1, p. 59–68, 2011. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21118824/>.
- ERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M.; SOUZA, F. R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférrico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 681-691, 2010.

BONETTI, J. de A.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D. de; CARNEIRO, M. A. C.; CAETANO, J. O. Soil physical and biological properties in an integrated crop-livestock system in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 53, n. 11, p. 1239–1247, 2018. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/pab/a/Z3TQdxXHWf3WnHPR76Tfnjj/?format=html>.

BONETTI, J. de A.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D. de; CARNEIRO, M. A. C.; SILVA, G. N. D. Influência do sistema integrado de produção agropecuária no solo e na produtividade de soja e braquiária. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 104–112, 2015.

BONFIM-SILVA, E. M.; MONTEIRO, F. A. Nitrogênio e enxofre na adubação e em folhas diagnósticas e raízes do capimbraquiária em degradação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [s. l.], v. 39, n. 8, p. 1641–1649, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/rbz/a/RNWs4LyqLkK5j8qS8MrzdpB/?lang=pt>.

BONINI, C. S. B.; BONINI NETO, A.; ALVES, M. C.; VAZQUEZ, G. H.; COSTA, N. R. Qualidade física de solo degradado em recuperação. In: PUTTI, F. F.; SILVA, A. L. C. da; GABRIEL FILHO, L. R. A. **Tecnologias em agricultura sustentável**. 1ª ed. – Tupã: ANAP, 2017. cap. 1, p. 25-46, 2017.

BORGES, W. L.B.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Impact of crop-livestock-forest integration on soil quality. **Agroforestry Systems**, [s. l.], v. 93, n. 6, p. 2111–2119, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0329-0>.

BORGES, W. L. B.; DE SOUZA, I. M. D.; SARTO, M. V. M.; CALONEGO, J. C.; DE FREITAS, R. S.; ROSOLEM, C. A. Chemical and physical attributes of an Ultisol under sustainable agricultural production systems. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 1–8, 2019.

BRADY, N.; WEIL, R. **The nature and properties of soils**. vol. 13. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2008.

CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio da palha de plantas de cobertura em diferentes estádios de senescência após a dessecação química. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 99–108, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/rbcs/a/S9bRDdhYtWRnzntLvZxHJWy/abstract/?lang=pt>.

CALONEGO, J.C.; GIL, F. C.; ROCCO, V. F.; DOS SANTOS, E. A. Persistence and nutrient release from maize, brachiaria and lablab straw | Persistência e liberação de nutrientes da palha de milho, braquiária e labe-labe. **Bioscience Journal**, [s. l.], v. 28, n. 5, p. 770–781, 2012.

CALONEGO, J. C.; RAPHAEL, J. P. A.; RIGON, J. P. G.; OLIVEIRA NETO, L. de; ROSOLEM, C. A. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 85, p. 31–37, 2017.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 242–249, 2010.

CARMEIS FILHO, A. C. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; GUIMARÃES, T. M.; CALONEGO, J. C.; MOONEY, S. J. Impact of Amendments on the Physical Properties of Soil under Tropical Long-Term No Till Conditions. **Plos One**, [s. l.], v. 11, n. 12, p. e0167564, 2016. Disponível em: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0167564>.

CARNEIRO, R. G.; MENDES, I. D. C.; LOVATO, P. E.; CARVALHO, A. M. De; VIVALDI, L. J. Soil biological indicators associated to the phosphorus cycle in a Cerrado soil under no-till and conventional tillage systems. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, [s. l.], v. 39, n. 7, p. 661–669, 2004.

CARVALHO, P. C. F.; ANGHINONI, I.; DE MORAES, A.; DE SOUZA, E. D.; SULC, R. M.; LANG, C. R.; FLORES, J. P. C.; TERRA LOPES, M. L.; DA SILVA, J. L. S.; CONTE, O.; DE LIMA WESP, C.; LEVIEN, R.; FONTANELI, R. S.; BAYER, C. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, [s. l.], v. 88, n. 2, p. 259–273, 2010.

CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; PÍCCOLO, M. C.; GODINHO, V. P.; CERRI, C. C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 103, n. 2, p. 342–349, 2009.

CARVALHO, P. C. de F.; MORAES, A. de; PONTES, L. da S.; ANGHINONI, I.; SULC, R. M.; BATELLO, C. Definições e terminologias para Sistema Integrado de Produção Agropecuária. **Revista Ciência Agronômica**, [s. l.], v. 45, n. 5spe, p. 1040–1046, 2014.

CARVALHO, A. M. de; RIBEIRO, L. R. P.; MARCHÃO, R. L.; DE OLIVEIRA, A. D.; PULROLNIK, K.; DE FIGUEIREDO, C. C. Chemical composition of cover crops and soil organic matter pools in no-tillage systems in the Cerrado. **Soil Use and Management**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 940–952, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/sum.12746>.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de cultura e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do solo** [s. l.], v. 22, p. 527–538, 1998.

CHEN, G.; WEIL, R. R.; HILL, R. L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 136, p. 61–69, 2014.

COLOMBI, T.; BRAUN, S.; KELLER, T.; WALTER, A. Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 574, p. 1283–1293, 2017.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Portal de informações agropecuárias: Série histórica**. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html>, acesso em: 29/04/2022.

CORBEELS, M.; MARCHÃO, R. L.; NETO, M. S.; FERREIRA, E. G.; MADARI, B. E.;

SCOPEL, E.; BRITO, O. R. Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. **Scientific Reports** **2016** **6:1**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 1–8, 2016. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep21450>.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; BUZETTI, S.; LOPES, K. S. M.; SANTOS, F. G. dos; PARIZ, C. M. Acúmulo de macronutrientes e decomposição da palhada de braquiárias em razão da adubação nitrogenada durante e após o consórcio com a cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, [s. l.], v. 38, n. 4, p. 1223–1233, 2014.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; LIMA, C. G. da R.; DE CASTILHOS, A. M.; DE SOUZA, D. M.; BONINI, C. dos S. B.; PARIZ, C. M. Yield and nutritive value of the silage of corn intercropped with tropical perennial grasses. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, [s. l.], v. 52, n. 1, 2017.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; BOSSOLANI, J. W.; PASCOALOTO, I. M.; DA ROCHA LIMA, C. G.; DOS SANTOS BATISTA BONINI, C.; DE CASTILHOS, A. M.; CALONEGO, J. C. Soybean yield and nutrition after tropical forage grasses. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, [s. l.], v. 121, n. 1, p. 31–49, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-021-10157-2>.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; FERNANDES, J. C.; CAVASANO, F. A.; DE ULIAN, N. A.; PARIZ, C. M.; DOS SANTOS, F. G. Acúmulo de nutrientes e decomposição da palhada de braquiárias em função do manejo de corte e produção do milho em sucessão. **Revista Brasileirade Ciencias Agrarias**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 166–173, 2014.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; LOPES, K. S. M.; YOKOBATAKE, K. L.; FERREIRA, J. P.; PARIZ, C. M.; BONINI, C. dos S. B.; LONGHINI, V. Z. Atributos do Solo e Acúmulo de Carbono na Integração Lavoura-Pecuária em Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 39, n. 3, p. 852–863, 2015. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180240404022>.

COSTA, Nídia R.; CRUSCIOL, C. A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; PARIZ, C. M.; COSTA, C.; CASTILHOS, A. M.; SOUZA, D. M.; BOSSOLANI, J. W.; ANDREOTTI, M.; MEIRELLES, P. R. L.; MORETTI, L. G.; MARIANO, E. Recovery of ¹⁵N fertilizer in intercropped maize, grass and legume and residual effect in black oat under tropical conditions. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s. l.], v. 310, n. 3780, 2021.

COTRUFO, M. F.; SOONG, J. L.; HORTON, A. J.; CAMPBELL, E. E.; HADDIX, M. L.; WALL, D. H.; PARTON, W. J. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. **Nature Geoscience** **2015** **8:10**, [s. l.], v. 8, n. 10, p. 776–779, 2015. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ngeo2520>.

CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; BORGHI, E.; SORATTO, R. P.; MARTINS, P. O. Improving Soil Fertility and Crop Yield in a Tropical Region with Palisadegrass Cover Crops. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 107, n. 6, p. 2271–2280, 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/agronj14.0603>.

CRUZ, I. V. **Emissão de CO₂ e qualidade física e química do solo em Sistema Integrado de Produção Agropecuária com ovinos**. 2020. 96 f. Tese de Doutorado - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2020.

DALMAGRO, H. J.; LATHUILLIÈRE, M. J.; DE ARRUDA, P. H. Z.; SILVA JÚNIOR, A. A. Da; SALLO, F. da S.; COUTO, E. G.; JOHNSON, M. S. Carbon exchange in rainfed and irrigated cropland in the Brazilian Cerrado. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 316, p. 108881, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192322000740>.

DHALIWAL, J. K.; KUMAR, S. Hydro-physical soil properties as influenced by short and long-term integrated crop–livestock agroecosystems. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 85, n. 3, p. 789–799, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/saj2.20214>.

EBERHARDT, D.; MARCHÃO, R.; QUIQUAMPOIX, H.; LE GUERNEVÉ, C.; RAMAROSON, V.; SAUVADET, M.; MURAOKA, T.; BECQUER, T. Effects of companion crops and tillage on soil phosphorus in a Brazilian oxisol: a chemical and ³¹P NMR spectroscopy study. **Journal of Soils and Sediments**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 1024–1037, 2021a. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11368-020-02817-7>.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 3^a ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

FARIAS FILHO, J. de A.; SARTOR, L. R.; PAULA, A. L. de; FARENZENA, R.; RIBEIRO, M. Ciclagem de nitrogênio em sistemas integrados de produção agropecuária: efeitos da irrigação e ervilhaca. In: VI REUNIÃO PARANAENSE DE CIÊNCIA DO SOLO - RPCS, 2019, Ponta Grossa - PR. **Anais** [...]. Ponta Grossa - PR: [s. n.], 2019. p. 5.

FARIAS, L. do N.; SILVA, E. M. B.; GUIMARAES, S. L.; SOUZA, A. C. P. de; SILVA, T. J. A. da; SCHLICHTING, A. F. Concentration of nutrients and chlorophyll index in pigeon pea fertilized with rock phosphate and liming in cerrado oxisol. **African Journal of Agricultural Research**, [s. l.], v. 10, n. 14, p. 1743–1750, 2015. Disponível em: <https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-abstract/A611F3652327>.

FAUSTINO, L. L.; MARCIANO, C. R. Intervalo hídrico ótimo e valores críticos de densidade como indicadores de recuperação de um solo sob sistemas florestais e pasto. **Ciência Florestal**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 658–682, 2021. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/cflo/a/grfSZg4JBhWT65VWfC9sBfC/>.

FEHR, W.; CAVINESS, C. Stages of soybean development. Iowa: Iowa State University, 1977. 12p. (Special Report 80).

FERREIRA, A. C. de B.; BORIN, A. L. D. C.; LAMAS, F. M.; BOGIANI, J. C.; DA SILVA, M. A. S.; FILHO, J. L. da S.; STAUT, L. A. Soil carbon accumulation in cotton production systems in the Brazilian Cerrado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [s. l.], v. 42, p. 2020, 2019. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/asagr/a/rKWfjYgjqpVFBcQfWWVSyhH/?format=html&lang=en>.

Acesso em: 25 set. 2022.

FERREIRA, J. P.; ANDREOTTI, M.; PASCOALOTO, I. M.; COSTA, N. R.; AUGUSTO, J. G. Atributos químicos e físicos de um latossolo em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária. **Boletim de Indústria Animal**, [s. l.], v. 75, p. 1–17, 2018.

FERREIRA, C. dos R.; SILVA NETO, E. C. da; PEREIRA, M. G.; GUEDES, J. do N.; ROSSET, J. S.; ANJOS, L. H. C. dos. Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 198, p. 104533, 2020.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J. Intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distrófico, após o primeiro período de pastejo contínuo de brachiaria ruziziensis, em sistema integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 775–783, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/rbcs/a/W7fw5R6Fh69VCBv3WdRqdbn/abstract/?lang=pt>.

FIGUEIREDO, E. B. de; JAYASUNDARA, S.; DE OLIVEIRA BORDONAL, R.; BERCHIELLI, T. T.; REIS, R. A.; WAGNER-RIDDLE, C.; LA SCALA, N. Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting pasture-management systems in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 142, p. 420–431, 2017.

FLOSS, E. L. **Maximizando o rendimento da soja: ecofisiologia, nutrição e manejo**. Passo Fundo: Aldeia Sul, 2021.

FRANZLUEBBERS, A. J. Integrated crop-livestock systems in the southeastern USA. **Agronomy Journal**, v. 99, p. 361–372. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/agronj2006.0076>.

FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 66, n. 2, p. 95–106, 2002.

GARCIA, C. M. de P.; ANDREOTTI, M.; TARSITANO, M. A. A.; FILHO, M. C. M. T.; LIMA, A. E. da S.; BUZETTI, S. Análise econômica da produtividade de grãos de milho consorciado com forrageiras dos gêneros Brachiaria e Panicum em sistema plantio direto. **Revista Ceres**, v. 59, n. 2, p. 157–163, 2012.

GARCIA, C. M. de P.; COSTA, C.; MEIRELLES, P. R. de L.; ANDREOTTI, M.; PARIZ, C. M.; FREITAS, L. A.; FILHO, M. C. M. T. Wet and dry corn yield under intercrop cultivation with marandu grass and/or dwarf pigeon pea and nutritional value of the marandu grass in succession. **Australian Journal of Crop Science**, [s. l.], v. 10, n. 11, p. 1564–1571, 2016.

GARCIA, R. A.; LI, Y.; ROSOLEM, C. A. Soil Organic Matter and Physical Attributes Affected by Crop Rotation Under No-till. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 77, n. 5, p. 1724–1731, 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2136/sssaj2012.0310>.

GEELHOED, J. S.; HIEMSTRA, T.; VAN RIEMSDIJK, W. H. Phosphate and sulfate adsorption on goethite: Single anion and competitive adsorption. **Geochimica et**

Cosmochimica Acta, [s. l.], v. 61, n. 12, p. 2389–2396, 1997.

GIACOMINI, A. A.; BATISTA, K.; COLOZZA, M. T.; MATTOS, W. T.; GERDES, L.; OTSUK, I. P.; WERNER, J. C. Tiller population stability of Aruana guinea grass subjected to different cutting severities and fertilized with nitrogen. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 55–56, 2014. Disponível em: www.tropicalgrasslands.info.

HOBBS, P. R. Conservation agriculture: what is it and why is it important for future sustainable food production?. **The Journal of Agricultural Science**, [s. l.], v. 145, n. 2, p. 127–137, 2007.

JENSEN, E. S.; CARLSSON, G.; HAUGGAARD-NIELSEN, H. Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 40, n. 1, p. 1–9, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-020-0607-x>.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A., EVANS, D. D.; WHITE, J. L.; ENSMINGER, L. E.; CLARK, F. E.; (Ed.), **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 499-510.

KIBBLEWHITE, M. G.; RITZ, K.; SWIFT, M. J. Soil health in agricultural systems. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, [s. l.], n. September 2007, p. 685–701, 2008.

KLEIN, V. A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um latossolo vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 26–32, 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2008001100018&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt.

KLIEMANN, H. J.; BRAZ, A. J. P. B.; SILVEIRA, P. M. Da. Taxas de decomposição de resíduos de espécies de cobertura em Latossolo Vermelho distroférrico. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 21–28, 2006. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/193033/1/pat36n1Kliemann.pdf>.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: Klute, A. (ed.). **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. Part. 1, p. 635-662.

KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H.; COBUCCI, T. Opções e vantagens da Integração Lavoura-Pecuária e a produção de forragens na entressafra. **Informe Agropecuário**, [s. l.], v. 28, p. 16–29, 2007.

KLUTHCOUSKI, J.; YOKOYAMA, L. P. Opções de integração lavoura-pecuária. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. (Ed.). **Integração lavoura-pecuária**. 1.ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa, 2003. p.131-141.

KULAGOWSKI, R.; THOUMAZEAU, A.; LEOPOLD, A.; LIENHARD, P.; BOULAKIA, S.; METAY, A.; STURM, T.; TIXIER, P.; BRAUMAN, A.; FOGLIANI, B.; TIVET, F. Effects of conservation agriculture maize-based cropping systems on soil health and crop performance in New Caledonia. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 212, p.

105079, 2021. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198721001495>.

LAMAS, F. M. **Agricultura de Baixa Emissão de Carbono: tecnologias disponíveis**. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/55203563/artigo---agricultura-de-baixa-emissao-de-carbono-tecnologias-disponiveis>. Acesso em: 3 abril 2022.

LAMAS, F. M.; RICHETTI, A. Changes in land use in Mato Grosso do Sul. *Revista de Agricultura Neotropical*. **Revista de Agricultura Neotropical**, [s. l.], v. 4, p. 49–56, 2019.

LANDERS, J. N. Tropical crop-livestock systems in conservation agriculture: The Brazilian experience. *In: Integrated crop management*. 1. ed. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2007. p. 92. Disponível em: <http://www.fao.org/catalog/inter-e.htm>.

LEITE, L. F. C.; FREITAS, R. de C. A. de; SAGRILO, E.; GALVÃO, S. R. da S. Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos vegetais depositados sobre Latossolo Amarelo no Cerrado Maranhense. **Revista Ciencia Agronomica**, [s. l.], v. 41, n. 1, p. 29–35, 2010. Disponível em:
<http://www.scielo.br/j/rca/a/QTs7BSnmRmXNtq6hgC8nSPN/abstract/?lang=pt>.

LEONEL, F. P.; PEREIRA, J. C.; COSTA, M. G.; MARCO JÚNIOR, P.; LARA, L. A.; QUEIROZ, A. C. Comportamento produtivo e características nutricionais do capim-braquiária cultivado em consórcio com milho. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. 1, p. 177-189, 2009.

LI, F.; SØRENSEN, P.; LI, X.; OLESEN, J. E. Carbon and nitrogen mineralization differ between incorporated shoots and roots of legume versus non-legume based cover crops. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 446, n. 1–2, p. 243–257, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-019-04358-6>.

LIANG, Z.; MORTENSEN, E. Ø.; NOTARIS, C. De; ELSGAARD, L.; RASMUSSEN, J. Subsoil carbon input by cover crops depends on management history. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 326, p. 107800, 2022.

LOSS, A.; LOURENZI, C. R.; DOS SANTOS, E.; MERGEN, C. A.; BENEDET, L.; PEREIRA, M. G.; PICCOLO, M. de C.; BRUNETTO, G.; LOVATO, P. E.; COMIN, J. J. Carbon, nitrogen and natural abundance of ¹³C and ¹⁵N in biogenic and physicogenic aggregates in a soil with 10 years of pig manure application. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 166, p. 52–58, 2017.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M.; BEUTLER, S. J. Soil fertility, physical and chemical organic matter fractions, natural ¹³C and ¹⁵N abundance in biogenic and physicogenic aggregates in areas under different land use systems. **Soil Research**, [s. l.], v. 52, n. 7, p. 685–697, 2014.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: O estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [s. l.], v. 38, n. SUPPL. 1, p. 133–146, 2009. Disponível em: www.sbz.org.br.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. v. 1. Agronômica Ceres Sao Paulo, 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Metodologia para análise de elementos em material vegetal**. v. 2. Associação brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato. Piracicaba, 1997.

MALUF, H. J. G. M.; SOARES, E. M. B.; SILVA, I. R. da; NEVES, J. C. L.; SILVA, L. de O. G. Decomposição de resíduos de culturas e mineralização de nutrientes em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, [s. l.], v. 39, n. 6, p. 1681–1689, 2015.

MANGARAVITE, J. C. S.; PASSOS, R. R.; VAZ ANDRADE, F. V.; BURAK, D. L.; MENDONÇA, E. de S. Phytomass production and nutrient accumulation by green manure species. **Revista Ceres**, [s. l.], v. 61, n. 5, p. 732–739, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737X201461050017>.

MapBiomass – **Mapeamento Anual de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. Coleção 6, acessado em: 02/03/2022. Disponível em: < https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Fact_Sheet_PASTAGEM_13.10.2021_ok_ALTA.pdf >.

MARCHÃO, R. L.; BALBINO, L. C.; SILVA, E. M. da; SANTOS JUNIOR, J. de D. G. dos; SÁ, M. A. C. de; VILELA, L.; BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 42, n. 6, p. 873–882, 2007.

MATEUS, G. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; COSTA, N. R.; BORGHI, E.; COSTA, C.; MARTELLO, J. M.; CASTILHOS, A. M.; FRANZLUEBBERS, A. J.; CANTARELLA, H. Corn intercropped with tropical perennial grasses as affected by sidedress nitrogen application rates. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, [s. l.], v. 116, n. 2, p. 223–244, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-019-10040-1>.

MEIMAROGLOU, N.; MOUZAKIS, C. Cation Exchange Capacity (CEC), texture, consistency and organic matter in soil assessment for earth construction: The case of earth mortars. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 221, p. 27–39, 2019.

MELO, T. R. de; PEREIRA, M. G.; CESARE BARBOSA, G. M. de; SILVA NETO, E. C. da; ANDRELLO, A. C.; FILHO, J. T. Biogenic aggregation intensifies soil improvement caused by manures. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 190, p. 186–193, 2019.

MERLIN, A.; HE, Z. L.; ROSOLEM, C. A. Ruzigrass affecting soil-phosphorus availability. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 48, n. 12, p. 1583–1588, 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2013001200007&lng=en&tlng=en.

MORAES, A.; CARVALHO, P. C. de F.; ANGHINONI, I.; LUSTOSA, S. B. C.; COSTA, S. E. V. G. de A.; KUNRATH, T. R. Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 57, p. 4–9, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2013.10.004>.

NOURI, A.; LEE, J.; YIN, X.; TYLER, D. D.; SAXTON, A. M. Thirty-four years of no-tillage and cover crops improve soil quality and increase cotton yield in Alfisols, Southeastern USA. **Geoderma**, [s. l.], v. 337, p. 998–1008, 2019.

NOURI, A.; YOUSSEF, F.; BASARAN, M.; LEE, J.; SAXTON, A. M.; ERPUL, G. The Effect of Fallow Tillage Management on Aeolian Soil Losses in Semiarid Central Anatolia, Turkey. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 1–13, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/age2018.07.0019>.

OLIVEIRA, Y. M. M. de; MATTOS, P. P. de; ANDRADE, A. G. de. Demands and opportunities for sustainable development. In: VILELA, G. F.; BENTES, M. P. de M.; OLIVEIRA, Y. M. M. de; MARQUES, D. K. S.; SILVA, J. C. B. (org.). **Life on land: contributions of Embrapa**. Brasília: Embrapa, 2019. p. 21–25.

PACHECO, L. P.; BARBOSA, J. M.; LEANDRO, W. M.; MACHADO, P. L. O. de A.; ASSIS, R. L. de; MADARI, B. E.; PETTER, F. A. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura e produtividade de soja e arroz em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 48, n. 9, p. 1228–1236, 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2013000900006&lng=pt&tlng=pt.

PARIZ, C.M.; ANDREOTTI, M.; BERGAMASCHINE, A. F.; BUZETTI, S.; COSTA, N. R.; CAVALLINI, M. C. Produção, composição bromatológica e índice de clorofila de braquiárias após o consórcio com milho. **Archivos de Zootecnia**, [s. l.], v. 60, n. 232, p. 1041–1052, 2011.

PARIZ, C.M.; ANDREOTTI, M.; BUZETTI, S.; BERGAMASCHINE, A. F.; ULIAN, N. de A.; FURLAN, L. C.; MEIRELLES, P. R. de L.; CAVASANO, F. A. Straw decomposition of nitrogen-fertilized grasses intercropped with irrigated maize in an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 35, n. 6, p. 2029–2037, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/rbcs/a/WLhPV8yg9BLQjYjvXRRk4Zz/abstract/?lang=en>.

PARIZ, C. M.; COSTA, N. R.; COSTA, C.; CRUSCIOL, C. A. C.; DE CASTILHOS, A. M.; DE LIMA MEIRELLES, P. R.; CALONEGO, J. C.; ANDREOTTI, M.; DE SOUZA, D. M.; CRUZ, I. V.; LONGHINI, V. Z.; PROTES, V. M.; SARTO, J. R. W.; DE TOLEDO PIZA, M. L. S.; DE PAULA MELO, V. F.; SEREIA, R. C.; FACHIOILLI, D. F.; DE ALMEIDA, F. A.; DE SOUZA, L. G. M.; FRANZLUEBBERS, A. J. An Innovative Corn to Silage-Grass-Legume Intercropping System With Oversown Black Oat and Soybean to Silage in Succession for the Improvement of Nutrient Cycling. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [s. l.], v. 0, p. 240, 2020.

PARIZ, C. M.; COSTA, C.; CRUSCIOL, C. A. C.; CASTILHOS, A. M.; MEIRELLES, P. R. L.; ROÇA, R. O.; PINHEIRO, R. S. B.; KUWAHARA, F. A.; MARTELLO, J. M.; CAVASANO, F. A.; YASUOKA, J. I.; SARTO, J. R. W.; MELO, V. F. P.; FRANZLUEBBERS, A. J. Lamb production responses to grass grazing in a companion crop system with corn silage and oversowing of yellow oat in a tropical region. **Agricultural Systems**, [s. l.], v. 151, p. 1–11, 2017b.

PARIZ, C. M.; COSTA, C.; CRUSCIOL, C. A. C.; MEIRELLES, P. R. L.; CASTILHOS,

A. M.; ANDREOTTI, M.; COSTA, N. R.; MARTELLO, J. M.; SOUZA, D. M.; PROTES, V. M.; LONGHINI, V. Z.; FRANZLUEBBERS, A. J. Production, nutrient cycling and soil compaction to grazing of grass companion cropping with corn and soybean.

Nutrient Cycling in Agroecosystems, [s. l.], v. 108, n. 1, p. 35–54, 2017a.

Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-016-9821-y>.

PARIZ, C. M.; COSTA, C.; CRUSCIOL, C. A. C.; MEIRELLES, P. R. L.; CASTILHOS, A. M.; ANDREOTTI, M.; COSTA, N. R.; MARTELLO, J. M.; SOUZA, D. M.; SARTO, J. R. W.; FRANZLUEBBERS, A. J. Production and Soil Responses to Intercropping of Forage Grasses with Corn and Soybean Silage. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 108, n. 6, p. 2541–2553, 2016. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/agronj2016.02.0082>.

PAVINATO, P. S.; CHERUBIN, M. R.; SOLTANGHEISI, A.; ROCHA, G. C.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 1–11, 2020.

Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72302-1>.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 32, n. 3, p. 911–920, 2008.

PELLEGRINI, A.; MEINERZ, G. R.; KAISER, D. R. Compactação do solo em sistemas intensivos de integração lavoura-pecuária leiteira. In: TIECHER, T. (Org.). **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no Sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água**. Porto Alegre: UFRG, 2016. 186p.

PEREIRA E SILVA, M. C.; SEMENOV, A. V.; VAN ELSAS, J. D.; SALLES, J. F. Seasonal variations in the diversity and abundance of diazotrophic communities across soils. **FEMS Microbiology Ecology**, [s. l.], v. 77, n. 1, p. 57–68, 2011.

PITTELKOW, C. M.; LINQUIST, B. A.; LUNDY, M. E.; LIANG, X.; VAN GROENIGEN, K. J.; LEE, J.; VAN GESTEL, N.; SIX, J.; VENTEREA, R. T.; VAN KESSEL, C. When does no-till yield more? A global meta-analysis. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 183, p. 156–168, 2015.

POLIDORO, J. C.; DE FREITAS, P. L.; HERNANI, L. C.; ANJOS, L. H. C. dos; RODRIGUES, R. de A. R.; CESÁRIO, F. V.; ANDRADE, A. G. de; RIBEIRO, J. L. Potential impact of plans and policies based on the principles of conservation agriculture on the control of soil erosion in Brazil. **Land Degradation and Development**, [s. l.], v. 32, n. 12, p. 3457–3468, 2021. Disponível em: <https://www.authorea.com/doi/full/10.22541/au.158750264.42640167?commit=8ec3ada4c79b971cdade8146043d59676c3bc3e6d>.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H. J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, [s. l.], v. 314, p. 122–137, 2018.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. [S. l.]: Instituto Agrônomo de Campinas-IAC, 2001. Disponível em: www.iac.br.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Boletim Técnico 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas-IAC, 1997.

RAMOS, M. L. G.; DA SILVA, V. G.; DE CARVALHO, A. M.; MALAQUIAS, J. V.; DE OLIVEIRA, A. D.; DE SOUSA, T. R.; SILVA, S. B. Carbon fractions in soil under no-tillage corn and cover crops in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 55, p. 1–9, 2021. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/pab/a/7ppJ74XdLL4pKzWBYdNpR9b/?lang=en&format=html>.

REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, [s. l.], v. 110, n. 1–2, p. 131–146, 2002.

ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C. Phosphorus and potassium budget in the soil–plant system in crop rotations under no-till. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 126, p. 127–133, 2013.

RUSSELLE, M. P.; ENTZ, M. H.; FRANZLUEBBERS, A. J. Reconsidering integrated crop-livestock systems in North America. In: **AGRONOMY JOURNAL**, 2007, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2007. p. 325–334. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/agronj2006.0139>.

SAINJU, U. M.; SINGH, B. P.; WHITEHEAD, W. F.; WANG, S. Accumulation and Crop Uptake of Soil Mineral Nitrogen as Influenced by Tillage, Cover Crops, and Nitrogen Fertilization. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 99, n. 3, p. 682–691, 2007. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/agronj2006.0177>.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema Radicular de Plantas e Qualidade do Solo**. Embrapa Agropecuária Oeste - Comunicado Técnico (INFOTECA-E). Dourados: [s. n.], 2014.

SANT-ANNA, S. A. C. de; JANTALIA, C. P.; SÁ, J. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Changes in soil organic carbon during 22 years of pastures, cropping or integrated crop/livestock systems in the Brazilian Cerrado. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, [s. l.], v. 108, n. 1, 2017.

SANTOS, H.; JACOMINE, P.; ANJOS, L.; OLIVEIRA, V.; LUMBRERAS, J.; COELHO, M.; ALMEIDA, JA, ARAUJO FILHO, J.; OLIVEIRA, J.; TJF, C. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5º rev. 2018.

SAVIAN, J. V.; SCHONS, R. M. T.; MARCHI, D. E.; FREITAS, T. S. de; DA SILVA NETO, G. F.; MEZZALIRA, J. C.; BERNDT, A.; BAYER, C.; CARVALHO, P. C. de F. Rotatinnuous stocking: A grazing management innovation that has high potential to mitigate methane emissions by sheep. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 186, p. 602–608, 2018.

SCHMATZ, R.; RECOUS, S.; AITA, C.; TAHIR, M. M.; SCHU, A. L.; CHAVES, B.; GIACOMINI, S. J. Crop residue quality and soil type influence the priming effect but not the fate of crop residue C. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 414, n. 1–2, p. 229–245, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-016-3120-x>.

SCOPEL, E.; TRIOMPHE, B.; AFFHOLDER, F.; DA SILVA, F. A. M. E.; CORBEELS, M.; XAVIER, J. H. V.; LAHMAR, R.; RECOUS, S.; BERNOUX, M.; BLANCHART, E.; DE CARVALHO MENDES, I.; DE TOURDONNET, S. Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 113–130, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-012-0106-9>.

SEREIA, R. C. **Atributos físicos e químicos do solo sob área de integração lavoura pecuária**. 2017. 146 f. Tese de Doutorado - Universidade Estadual Paulista, 2017.

SILVA, H. A. da; MORAES, A. de; CARVALHO, P. C. de F.; DA FONSECA, A. F.; CAIRES, E. F.; DIAS, C. T. dos S. Chemical and physical soil attributes in integrated crop-livestock system under no-tillage. **Revista Ciencia Agronomica**, [s. l.], v. 45, n. 5, p. 946–955, 2014. Disponível em: www.ccarevista.ufc.br.

SILVA, R. H. da; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 37, n. 6, p. 855–860, 2002.

SINGH, S.; SHARMA, P. K.; SINGH, S.; KUMAR, A. Addition of crop residues with different C:N ratios on the release pattern of available nitrogen and sulfur in different soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s. l.], v. 52, n. 22, p. 2912–2920, 2021. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00103624.2021.1971692>.

SKOPP, J.; JAWSON, M. D.; DORAN, J. W. Steady-State Aerobic Microbial Activity as a Function of Soil Water Content. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 54, n. 6, p. 1619–1625, 1990.

SOUSA, D. C. de; MEDEIROS, J. C.; DALLA ROSA, J.; LACERDA, J. J. de J.; MAFRA, Á. L.; MENDES, W. de S. Chemical attributes of agricultural soil after the cultivation of cover crops. **Australian Journal of Crop Science**, [s. l.], v. 11, n. 11, p. 1835–2707, 2017.

TAGHIZADEH-TOOSI, A.; HANSEN, E. M.; OLESEN, J. E.; BARAL, K. R.; PETERSEN, S. O. Interactive effects of straw management, tillage, and a cover crop on nitrous oxide emissions and nitrate leaching from a sandy loam soil. **Science of The Total Environment**, [s. l.], p. 154316, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969722014097>.

TEIXEIRA, R. S.; SOUSA, R. N.; MAYRINK, G. C. V.; SOARES, E. M. B.; SILVA, I. R. Efeito priming da matéria orgânica do solo pela adição de resíduos de eucalipto e aplicação de diferentes formas de N. In: XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2015, Natal, RN. **Anais [...]**. Natal, RN: [s. n.], 2015. p. 5–8.

TORMENA, A. C. Compactação dos solos em SPD precisa ser atenuada. **Visão Agrícola**, n. 9, p. 194-197, 2009.

VARELA, M. F.; BARRACO, M.; GILI, A.; TABOADA, M. A.; RUBIO, G. Biomass Decomposition and Phosphorus Release from Residues of Cover Crops under No-Tillage. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 109, n. 1, p. 317–326, 2017.

VELOSO, M. G.; CECAGNO, D.; BAYER, C. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 190, p. 139–146, 2019.

WITHERS, P. J. A.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; DE CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R. G.; BENITES, V. D. M.; GATIBONI, L. C.; DE SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. D. S.; ROSOLEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA, A. De; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 1–13, 2018. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-20887-z>.

YAO, Z.; XU, Q.; CHEN, Y.; LIU, N.; HUANG, L.; ZHAO, Y.; ZHANG, D.; LI, Y.; ZHANG, S.; CAO, W.; ZHAI, B.; WANG, Z.; ADL, S.; GAO, Y. Enhanced Stabilization of Soil Organic Carbon by Growing Leguminous Green Manure on the Loess Plateau of China. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 83, n. 6, p. 1722–1732, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2136/sssaj2019.03.0089>.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of American Society of Agronomy**, v. 28, p. 337-351, 1936.

ZHANG, X.; SUN, Z.; LIU, J.; OUYANG, Z.; WU, L. Simulating greenhouse gas emissions and stocks of carbon and nitrogen in soil from a long-term no-till system in the North China Plain. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 178, 2018.