

**RODRIGO CÉSAR SEREIA**

**QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS CONSORCIADOS DE MILHO, CAPIM-  
MARANDU E FEIJÃO-GUANDU E SOBRESSEMEADURA DA AVEIA PARA  
PASTEJO DE CORDEIROS**

BOTUCATU  
2017



**RODRIGO CÉSAR SEREIA**

**QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS CONSORCIADOS DE MILHO, CAPIM-  
MARANDU E FEIJÃO-GUANDU E SOBRESSEMEADURA DA AVEIA PARA  
PASTEJO DE CORDEIROS**

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

BOTUCATU  
2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

S483q Sereia, Rodrigo César, 1986-  
Qualidade do solo em sistemas consorciados de milho, capim-marandu e feijão-gandu e sobressemeadura da aveia para pastejo de cordeiros / Rodrigo César Sereia. - Botucatu: [s.n.], 2017  
144 p.: grafs. color., tabs.

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2017  
Orientador: Juliano Carlos Calonego  
Inclui bibliografia

1. Milho. 2. Feijão-gandu. 3. Aveia. 4. Cultivo consorciado. 5. Qualidade do solo. I. Calonego, Juliano Carlos. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS CONSORCIADOS DE MILHO, CAPIM-MARANDU E FEIJÃO-GUANDU E SOBRESSEMEADURA DA AVEIA PARA PASTEJO DE CORDEIROS

**AUTOR:** RODRIGO CÉSAR SEREIA

**ORIENTADOR:** JULIANO CARLOS CALONEGO

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

  
Prof. Dr. JULIANO CARLOS CALONEGO

Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas - UNESP - Câmpus de Botucatu

  
Dra NÍDIA RAQUEL COSTA

Pos-Doc do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu

  
Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu

  
Prof. Dr. CARLOS SERGIO TIRITAN

Departamento de Agronomia / UNIVERSIDADE DO OESTE PAULISTA

  
Dr. GUSTAVO PAVAN MATEUS

Departamento de Descentralização do Desenvolvimento / Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios

Botucatu, 20 de dezembro de 2017.



## *DEDICATÓRIA*

*Aos meus amados pais, João Batista Sereia e Maria Neide Rodrigues Sereia e a  
minha irmã Aline Fernanda Rodrigues Sereia.*



## AGRADECIMENTOS

*Primeiramente a Deus, por sempre guiar meus passos por onde vou e me dar a força e o discernimento necessário para atingir meus objetivos, tanto profissionais quanto humano.*

*Aos meus pais, Maria e João por todo alicerce para construção e realização dos meus sonhos e objetivos aos quais terei todo amor e gratidão por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos da minha vida. Obrigado por apontar o caminho, as direções e fornecer as ferramentas, os ensinamentos e humildade necessários para superar os obstáculos da vida. Terão minha gratidão eterna e espero um dia conseguir retribuir esses inestimáveis atos de sacrifícios, de privações, colocando-se sempre em segundo plano, prevalecendo sempre a oferta de amor, zelo, educação, honestidade e humildade. Vocês realmente são os melhores seres humanos que conhecerei na vida!*

*À minha irmã Aline Sereia e meu irmão cunhado Felipe Broering por todo afeto e zêlo e que sempre serviram de inspiração como seres humanos e profissionais.*

*Aos meus avós José Rodrigues de Oliveira (in memoriam) e Luzia Miguel de Oliveira, por me dar todo apoio, aconchego e carinho sempre.*

*A minha namorada e companheira Helen Prosdocini por sempre estar ao meu lado e que sempre depositou todo seu amor incondicional, possibilitando encarar as dificuldades e alcançar as superações desta jornada, além de toda colaboração na execução desta pesquisa. Sem você a vida seria muito mais difícil.*

*A família Prosdocini por todo apoio, companheirismo, suporte e afeto, em que sempre ofereceram amparo familiar.*

*Ao meu orientador Prof. Dr. Juliano Carlos Calonego, pela orientação e pelo tempo que generosamente dedicou transmitindo-me os melhores e mais úteis ensinamentos, sempre com paciência, serenidade e acima de tudo pela confiança.*

*Aos integrantes da banca, Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol, Prof. Dr. Carlos Sérgio Tiritan, Dr<sup>a</sup> Nídia Raquel Costa e Pesq. Dr. Gustavo Pavan Mateus pelas valiosas contribuições para melhor síntese desse trabalho. Aos membros suplentes da banca Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes, Dr. Sandro*

*Roberto Brancalião e Prof. Dr. Edemar Moro, que aceitaram gentilmente o convite para compor o corpo de profissionais para esta defesa de doutorado.*

*Aos amigos sempre presentes mesmo que distantes, Adolpho Vaz, Igor Bumbieris, Antônio Neto Neto, João Victor, Helio Moreira, Antony Almeida, Isaias Onofre, Elvis Umemura, Bruno Felipe, Rafael Umemura e Marcelo Umemura pelos bons momentos de distração e de apoio para enfrentar a vida da melhor forma possível.*

*Aos amigos Igor Cruz e Nídia Costa, pelas conversas, amizade e contribuições inestimáveis, que levou a melhor síntese desse trabalho.*

*Ao Prof. Dr. Ciniro Costa e ao Dr. Cristiano Pariz, pela ótima parceria, acolhimento, toda estrutura e colaboração com esta pesquisa.*

*Aos estagiários, Vinicius Perino, Leonardo Botesi, Ana Paula e Mariana Prosdocini por todo apoio nos experimentos e análises laboratoriais.*

*À Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Campus de Botucatu, e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura, pela oportunidade de realização deste curso e auxílios na execução desse trabalho.*

*Ao Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal, ao Departamento de Ciências do solo e Recursos Naturais, à Fazenda de Ensino, Pesquisa e Produção da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP e à Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia pela infraestrutura oferecida para o desenvolvimento deste trabalho.*

*Ao conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos para realização desse trabalho.*

*À Fundação Agrisus – Agricultura Sustentável, pelo fomento concedido para realização deste trabalho.*

*E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização desse trabalho e pelas valiosas amizades. Que Deus abençoe cada um de vocês e proporcione muitas realizações e saúde!*

***Meus sinceros agradecimentos.***

*A maior riqueza de qualquer ser humano é amar e ser amado na sua própria família, porque a verdadeira felicidade está no próprio lar, entre as alegrias e superações da sua família e onde todos os elementos que a constituem são amigos, cúmplices e confidentes.*

*Rodrigo César Sereia*



## RESUMO

O uso de Sistemas Integrados de Produção Agropecuários (SIPA) contribui ativamente para aumentar e diversificar o aporte de material vegetal orgânico ao solo, importantes para suprir a demanda energética dos organismos presentes no sistema solo-planta. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar a influência de diferentes SIPA sob Sistema de Semeadura Direta (SSD), na qualidade dos atributos físicos e químicos do solo, na produção de silagem e de massa seca para cobertura do solo e no desenvolvimento de raízes. O experimento foi conduzido durante dois anos agrícolas (2013/14 e 2014/15) na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA/UNESP) no município de Botucatu/SP em um Latossolo Vermelho distrófico. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram: i) consórcio de milhoxcapim-marandu seguido de sobressemeadura de aveia a lanço (MB+ALA); ii) consórcio de milhoxcapim-marandu seguido de sobressemeadura de aveia em linha (MB+ALI); iii) consórcio de milhoxcapim-maranduxfeijão-guandu seguido de sobressemeadura de aveia a lanço (MBG+ALA) e iv) consórcio de milhoxcapim-maranduxfeijão-guandu seguido de sobressemeadura de aveia em linha (MBG+ALI). Foram realizadas coletas de solo e raiz nas camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,4 m e de matéria vegetal, ambos ao longo do tempo de 2 anos de condução do experimento. O uso de sobressemeadura de aveia a lanço com uso de gradagem niveladora para incorporação das sementes, após produção de silagem sob SIPA em SSD, aumentou a porosidade total (PT) e macroporosidade (MA) refletindo em melhoria na curva de retenção de água (CRA) e no índice S, aos 24 meses em todas as camadas avaliadas. As operações mecanizadas diminuíram o diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP), percentagem de agregados maiores que 2,0 mm (AGR>2) e o índice de estabilidade de agregados (IEA). O uso de feijão-guandu em cultivo consorciado com capim-marandu e milho para silagem sob SSD, aumentou a PT e MA e também refletiu em melhorias da CRA refletindo no aumento do índice S, semelhante aos sistemas que passaram pela gradagem para incorporação das sementes de aveia. A ação do pisoteio dos animais associado ao tráfego intensivo de máquinas em SIPA sob SPD, interferiram negativamente nos atributos físicos do solo, contudo, estas mudanças são atenuadas ao longo do tempo e não promoveram redução na produtividade das culturas. Menores quantidades de resíduos da colheita de silagem diminuíram a concentração de alguns nutrientes no solo, como o Ca, Mg, N e C, no entanto, sem atingir níveis críticos. O comprimento de raiz (CR) diminuiu nos SIPA que tiveram as melhores condições de PT, MA e CRA. O uso do feijão-guandu refletiu em aumento do diâmetro médio de raiz (DMR) no solo, principalmente devido ao ambiente mais favorável quanto aos atributos físicos do solo (PT, MA e CRA). Além disso menores teores de nutrientes no solo como o Ca reduziram também o DMR. O consórcio triplo milhoxcapim-maranduxfeijão-guandu aumentou a produtividade de massa seca de silagem (MSS) e de massa seca residual de silagem (MSRS) em período de baixa disponibilidade hídrica (safra 2013/14). O uso do feijão-guandu em SIPA sob SSD é uma ferramenta importante para promover alterações positivas nas propriedades físico-hídricas do solo bem como aumentar a produtividade de silagem e dos resíduos vegetais no solo, importantes para sustentabilidade do SSD.

**Palavras-chaves:** Qualidade do solo. Consórcio de culturas. Silagem. *Zea mays* L. *Cajanus cajan*. *Urochloa brizantha*. *Avena strigosa*.



## ABSTRACT

The use of Integrated Croplivestock System (ICS) actively contributes to increase and diversify the contribution of vegetable matter in the soil, important to supply the energy demand of the organisms being in the soil-plant system. The aim of this research was to evaluate the influence of different types of ICS under No-tillage System (NTS), on soil physical and chemical attributes quality, silage production and dry matter for soil cover and root development. The experiment was conducted during two agricultural years (2013/14 and 2014/15) in a Dystrophic Red Latosol, at Lageado Experimental Farm, belonging to the College of Agricultural Sciences (FCA/UNESP) - Botucatu / SP. The experimental was randomized block design, with four treatments and four replications. The crop systems consisted of: i) maize intercropping×marandu grass followed by oat oversowing in line (MG+OLI); ii) maize intercropping×marandu grass followed by oat broadcast oversown (MG+OBO); (iv) maize intercropping×marandu grass×pigeon pea followed by oat oversowing in line (MGP+OLI); (iv) maize intercropping×marandu grass×pigeon pea, followed by oat broadcast oversown (MGP+OBO). Soil and root collections were performed in the layers of 0.0-0.05; 0.05-0.1; 0.1-0.2; 0.2-0.4 m and vegetable matter, both over the course of 2 years of conducting the experiment. The use of broadcast oversown with the leveling harrow for seed incorporation after silage production under ICS in NTS increased total porosity (TP) and macroporosity (MA) reflecting in improvement in water retention curve (WRC) and S index at 24 months in all evaluated layers. Mechanized operations decreased the geometric mean diameter (GMD), weighted average diameter (WAD), percentage of aggregates larger than 2.0 mm (AGR>2) and index of stability of aggregates (ASI). The use of pigeon pea intercropping with marandu grass and maize for silage under NTS increased TP and MA and also reflected in improvements of WRC reflecting in the increase of the S index similar to the systems that have undergone harrowing for incorporation of oats seeds. The trampling of animals associated with intensive traffic of machines on ICS under no-tillage system interfered negatively in the physical attributes of the soil, however, these changes are attenuated over time and did not promote a reduction in crop productivity. Lower amounts of residue from the silage harvest decreased the concentration of some nutrients in the soil, such as Ca, Mg, N and C, however, not reaching critical levels. The root length (RL) decreases in the ICS that had better conditions of TP, MA and WRC. The use of pigeon pea increased root mean diameter (RMD) on soil, mainly due to better conditions of soil physical attributes (TP, MA, and WRC). Moreover, lower levels of soil nutrients such as Ca also reduced RMD. The triple intercropping maize×marandu grass×pigeon pea increased of dry mass of silage (DMS) and residual dry mass of silage (DMSR) productivity in period of low water availability (crop year 2013/14). The use of pigeon pea in ICS under NTS is an important tool to promote positive changes in the physical and water properties of the soil as well as to increase the productivity of silage and soil-plant residues, relevant for NTS sustainability.

**Keywords:** Soil quality. Intercropping. Silage. *Zea mays* L. *Cajanus cajan*. *Urochloa brizantha*. *Avena strigosa*.



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Valores $p$ do teste de F das variáveis densidade do solo (DS), porosidade total (PT), macroporosidade (MA) e microporosidade (MI) avaliadas nas camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2; 0,2 - 0,4 m.....	60
Tabela 2.	Efeito dos sistemas de produção e das épocas de avaliação na densidade do solo (DS), porosidade total (PT), macroporosidade (MA) e microporosidade (MI) avaliadas nas camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2; 0,2 - 0,4 m.....	61
Tabela 3.	Efeito das interações significativas dos sistemas de produção em função das épocas para a porosidade total do solo (kg dm <sup>-3</sup> ) nas camadas de 0,0 - 0,05 e 0,2 - 0,4 m.....	64
Tabela 4.	Efeito das interações significativas dos sistemas de produção em função das épocas de avaliação na macroporosidade do solo (dm <sup>3</sup> dm <sup>-3</sup> ) para as camadas do solo de 0,0 - 0,05 e 0,05 - 0,1 m.....	66
Tabela 5.	Efeito dos sistemas de produção em função das épocas na microporosidade do solo (dm <sup>3</sup> dm <sup>-3</sup> ) para as camadas do solo de 0,0 - 0,05 e 0,1 - 0,2 m.....	70
Tabela 6.	Valores $p$ do teste de F para as variáveis diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), agregados maiores que 2,0 mm (AGR>2), índice de estabilidade de agregados (IEA) e resistência do solo à penetração (RP) avaliadas nas camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2 e 0,2 - 0,4 m.....	72
Tabela 7.	Efeito dos sistemas de produção e das épocas no diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), agregados maiores que 2,0 mm (AGR>2), índice de estabilidade de agregados (IEA) e resistência do solo à penetração (RP) avaliados nas camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2; 0,2 - 0,4 m.....	73
Tabela 8.	Efeito dos sistemas de produção em função das épocas no diâmetro médio ponderado (mm) para as camadas do solo de 0,0 - 0,05 e 0,2 - 0,4 m.....	74

Tabela 9.	Efeito dos sistemas de produção em função das épocas no diâmetro médio geométrico (mm) para a camada do solo de 0,2 - 0,4 m.	75
Tabela 10.	Efeito dos sistemas de produção em função das épocas na percentagem de agregados maiores que 2 mm para as camadas do solo de 0,0 - 0,05 e 0,2 - 0,4 m.	76
Tabela 11.	Efeito dos sistemas de produção em função das épocas no índice de estabilidade de agregados (%) para as camadas do solo de 0,05 - 0,1 e 0,2 - 0,4 m.	77
Tabela 12.	Efeito dos sistemas de produção em função das épocas na resistência do solo a penetração (MPa) para as camadas do solo de 0,0 - 0,05 e 0,05 - 0,1 m.	77
Tabela 13.	Valores <i>p</i> do teste de F das variáveis acidez do solo (pH), hidrogênio+alumínio (H+Al), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), enxofre (S), nitrogênio (N) e carbono (C) avaliadas nas camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2; 0,2 - 0,4 m.	91
Tabela 14.	Efeito dos sistemas de produção e das épocas de avaliação na acidez do solo (pH) e nos teores de hidrogênio+alumínio (H+Al), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) avaliados nas camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2; 0,2 - 0,4 m.	92
Tabela 15.	Efeito dos sistemas de produção e das épocas nos teores de fósforo (P), enxofre (S), nitrogênio (N) e carbono (C) avaliadas nas camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2; 0,2 - 0,4 m.	97
Tabela 16.	Efeito dos sistemas de produção no comprimento de raiz (cm dm <sup>-3</sup> ) para as camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2 e 0,2 - 0,4 m aos 6 e 24 meses de avaliação.	102
Tabela 17.	Efeito dos sistemas de produção no diâmetro médio de raiz (mm) para as camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2 e 0,2 - 0,4 m aos 6 e 24 meses de avaliação.	104

Tabela 18.	Valores <i>p</i> do teste de F das variáveis massa seca de silagem (MSS), produtividade de grãos que compõem a silagem (PG), massa seca residual do milho (MSRM), massa seca residual do feijão-guandu (MSRG), massa seca residual do capim-marandu (MSRB) e massa seca residual total da silagem (MSRS) nos anos agrícolas de 2013/2014 e 2014/2015.....	106
Tabela 19.	Desdobramento das interações significativas para a produtividade de massa seca de silagem (MSS) nos sistemas integrados de produção agropecuários durante as safras 2013/2014 e 2014/2015.....	107
Tabela 20.	Desdobramento das interações significativas para a produtividade de grãos de milho (PG) que compõem a silagem nos sistemas integrados de produção agropecuários durante as safras 2013/2014 e 2014/2015.....	108
Tabela 21.	Massa seca residual de colmos de milho (MSRM), do feijão-guandu (MSRG), do capim-marandu (MSRB) e total (MSRS) nos sistemas integrados de produção agropecuários e durante as safras 2013/2014 e 2014/2015.....	111
Tabela 22.	Efeito dos sistemas de produção na produtividade de massa seca vegetal (MSV) nos períodos de entressafra de 2014 e 2015.....	113



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Valores mensais acumulados para precipitação pluviométrica, temperaturas médias máxima (Tmax) e mínima (Tmin), durante o período experimental, nos meses de outubro de 2013 a novembro de 2015.....	47
Figura 2.	Influência dos sistemas de produção na curva de retenção de água do solo aos 6 meses nas camadas de 0,0 a 0,05 (A); 0,05 a 0,1 (B); 0,1 a 0,2 (C); 0,2 a 0,4 (D) m.....	83
Figura 3.	Influência dos sistemas de produção na curva de retenção de água do solo aos 24 meses nas camadas de 0,0 a 0,05 (A); 0,05 a 0,1 (B); 0,1 a 0,2 (C); 0,2 a 0,4 (D) m.....	86
Figura 4.	Valores do Índice S dos sistemas de produção no 6º e 24º mês de experimento nas camadas de 0,0 - 0,05 (A); 0,05 - 0,1 (B); 0,1 - 0,2 (C) e 0,2 - 0,4 (D) m.....	90



## LISTA DE QUADROS

- Quadro 2. Informações sobre as cultivares, datas de semeadura, espaçamento entre linhas, densidade de semeadura, fertilização e data de colheita ou manejo para as espécies utilizadas nos sistemas de cultivo de 2013 a 2015..... 49
- Quadro 1. Características químicas do solo em duas profundidades na área experimental antes do início do experimento em setembro de 2013..... 48



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>28</b>
2.1	SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA (SIPA) SOB SISTEMA DE SEMEADURA DIRETA (SSD)	28
2.2	SISTEMA SANTA BRÍGIDA DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA	32
2.3	ESTABELECIMENTO DE PASTAGENS CONSORCIADAS COM O MILHO E/OU LEGUMINOSAS EM SIPA	34
2.4	FORMAÇÃO DE PALHADA PARA O SSD E CICLAGEM DE NUTRIENTES	37
2.5	QUALIDADE QUÍMICA E FÍSICA DO SOLO EM SIPA	39
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>45</b>
3.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	45
3.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS	45
3.3	CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DA ÁREA EXPERIMENTAL E DADOS METEOROLÓGICOS	46
3.4	HISTÓRICO, INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO	48
3.5	COLETAS DE SOLO	52
3.6	ANÁLISES FÍSICAS DO SOLO	53
3.6.1	<i>Densidade do solo, densidade real, porosidade total, macroporosidade e microporosidade</i>	53
3.6.2	<i>Estabilidade de agregados</i>	53
3.6.3	<i>Resistência do solo à penetração</i>	55
3.6.4	<i>Curva de retenção de água no solo e índice S</i>	55
3.7	ANÁLISES QUÍMICAS DO SOLO	57
3.8	COLETA E ANÁLISE DE RAIZ	57
3.9	PRODUTIVIDADE DE MASSA SECA DOS COMPONENTES VEGETAIS DA SILAGEM NA SAFRA	58
3.10	PRODUTIVIDADE DE MASSA SECA VEGETAL NA ENTRESSAFRA	58
3.11	ANÁLISE ESTATÍSTICA	59
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>60</b>
4.1	FÍSICA DO SOLO	60
4.1.1	<i>Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo</i>	60
4.1.2	<i>Diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico, percentagem de agregados maiores que 2,0 mm, índice de estabilidade de agregados e resistência do solo a penetração</i>	71
4.1.3	<i>Curva de retenção de água no solo e índice S</i>	80
4.2	QUÍMICA DO SOLO	91
4.3	RAIZ	101
4.4	PRODUÇÃO VEGETAL	106
4.4.1	<i>Produtividade de massa seca das culturas produzidas para ensilagem nos períodos de safra</i>	106
4.4.2	<i>Produção de massa seca vegetal nos períodos de entressafra</i>	113

<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>116</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>117</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>143</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção agropecuária é dependente das condições climáticas, da qualidade do solo e do manejo que lhe é dado. Proporcionar condições mais favoráveis ao desenvolvimento das plantas e minimizar as adversidades encontradas no ambiente, principalmente relacionadas às condições edafoclimáticas, tem sido um dos maiores desafios enfrentados na produção agropecuária. Indubitavelmente, esses desafios motivam o desenvolvimento tecnológico, além disso, provocam o desenvolvimento de métodos de manejos cada vez mais inovadores e eficientes para manutenção dos sistemas de produção agropecuários.

Dentre os fatores relacionados ao clima, o recurso hídrico é um dos que limita em grande parte a produção e manutenção do sistema de produção. Períodos com distribuição irregulares de chuva, chamados “veranicos”, tem sido a grande causa das perdas de produtividade e insucesso na agricultura, tornando assim, cada vez mais difícil obter lucratividade no setor.

Lançar mão de manejos que promovam melhorias nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, associados à medidas mais conservacionistas como integrar sistemas de produção, aumentar aporte de material vegetal em superfície e em profundidade e consorciar plantas de diferentes gêneros e famílias, são estratégias de grande importância e que tem contribuído para atingir a sustentabilidade nos principais polos de produção agrícola do Brasil. Integrar sistemas de produção objetivando diversificar a renda com produtos de origem vegetal e animal, diminuindo os riscos de insucesso produtivo e adotar técnicas de consorciação de culturas, tem sido uma das mais importantes estratégias para maximizar os ganhos econômicos.

Além disso, a integração da produção contribui ativamente para aumentar e diversificar o aporte de material vegetal orgânico no solo, importantes para suprir a demanda energética dos organismos presentes no sistema solo-planta. Em contrapartida, implantar sistemas integrados de produção e utilizar técnicas de consorciação tem sido um dos grandes desafios para o setor agrícola, uma vez que naturalmente se aumenta a complexidade para a implantação, condução e manutenção do sistema como um todo, demandando assim, de refinados ajustes para se obter alto desempenho fitotécnico.

Ao longo da história, é evidente que a adoção do sistema de semeadura direta (SSD) proporcionou maior sustentabilidade ao setor agrícola, através de melhorias proporcionadas pela permanência da palha na superfície, melhorando assim, características do solo como a ciclagem de nutrientes, a manutenção dos recursos hídricos, da agregação do solo e do microclima, fatores estes que influenciam significativamente na ciclagem de nutrientes essenciais às plantas.

O SSD, que preconiza o mínimo revolvimento do solo, manutenção dos resíduos vegetais e rotação de culturas, pode ainda ser adotado utilizando-se técnicas de consorciação de culturas, como é o caso do milho [*Zea mays* (L.)] consorciado com espécies forrageiras como, por exemplo, as do gênero *Urochloa* (Trin.) Griseb. (syn. *Brachiaria*).

Muitas pesquisas demonstram que a utilização dessas forrageiras em consorciação com o milho é uma estratégia interessante para aumentar o aporte de material vegetal em superfície e em profundidade, através de seu sistema radicular agressivo e vigoroso e da sua alta capacidade de produção de matéria seca da parte aérea, mesmo sob condições edafoclimáticas restritivas.

A consorciação de milho pode ainda ser realizada com espécies forrageiras e leguminosas como o feijão-guandu [*Cajanus cajan* (L.) Millsp], visando aumentar e diversificar a introdução de material vegetal no sistema, tendo em vista que as leguminosas possuem sistema radicular pivotante, enquanto que o das gramíneas é fasciculado. Estas características peculiares podem resultar em mudanças distintas nos atributos físicos e químicos do solo, como aumento da retenção de água, aumento da porosidade, da absorção de nutrientes em camadas mais profundas, processo esse fundamental para a ciclagem de nutrientes no sistema solo planta.

O SSD associado à consorciação de milho com espécies forrageiras e/ou leguminosas podem ser utilizados na integração da agricultura com a pecuária, como é o caso dos sistemas integrados de produção agropecuários (SIPA). Adotar SIPA sob SSD, com o uso de técnicas de consorciação, é uma das alternativas mais utilizadas para obtenção de uma produção mais diversificada atingindo alta eficiência de uso da terra, fazendo assim, valer o conceito de sustentabilidade no cenário agropecuário mundial.

É possível observar grande quantidade de estudos relacionados aos impactos de SIPA e consorciação de milho com espécies forrageiras sob SSD nos atributos do solo. No entanto, há poucas informações a respeito da interação desses sistemas,

principalmente com a inclusão de espécies leguminosas como o feijão-guandu. Assim, a avaliação da qualidade física e química do solo nesta configuração e arranjo do sistema de produção é muito importante para esclarecer os benefícios proporcionados ao solo para melhoria contínua da produção agrícola.

O objetivo dessa pesquisa foi avaliar a influência de sistemas integrados de produção agropecuários (SIPA), sob sistema de semeadura direta (SSD), e sua influência na qualidade dos atributos físicos e químicos do solo, na produção de silagem, de massa seca para cobertura do solo e no desenvolvimento de raízes durante dois anos agrícolas.

É esperada uma melhoria nos atributos físicos e químicos do solo, bem como maior desenvolvimento de raízes sob os SIPA consorciados com a cultura do feijão-guandu [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.]. É esperado um aumento da produtividade de silagem bem como das quantidades de resíduos deixados sobre o solo após a colheita da silagem e em períodos de entressafra. Além disso, a sobressemeadura da aveia na modalidade a lanço, seguida de incorporação com grade niveladora, pode proporcionar maior revolvimento do solo e diminuindo a qualidade de alguns atributos físicos e químicos do solo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) sob sistema de semeadura direta (SSD)

Na maioria das regiões do mundo, principalmente onde a distribuição das chuvas é irregular durante o ano, geralmente é realizada apenas uma safra por ano agrícola. Esta safra é conduzida na estação chuvosa (verão), deixando o solo exposto e sujeito às intempéries do clima durante o resto do ano, o que muitas vezes pode causar erosão, perdas de nutrientes e conseqüentemente, redução em produtividade das culturas (BALBINOT JUNIOR et al., 2009; COSTA; ROSOLEM, 2007; CARVALHO et al., 2010, 2014; CALONEGO; ROSOLEM, 2010; COSTA et al., 2012a; CRUSCIOL et al., 2015, 2016; TRACY; ZHANG, 2008; HOANG, 2013; RAPHAEL et al., 2016).

Além disso, a intensificação da produção agrícola em muitas regiões do país, ao longo dos anos, tem proporcionado aumento da degradação de pastagens e do solo. Tal fato pode refletir em redução na qualidade do solo (atributos químicos, físicos e biológicos), além do inadequado manejo das culturas nos sistemas produção. Para solucionar este problema, vários agricultores e pesquisadores tem encontrado nos sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), rotação e consorciação de culturas sob semeadura direta (SSD), vantagens que proporcionam aumento em produtividade e diminuição dos impactos causados ao ambiente, tais como a diminuição da degradação do solo, menor uso de insumos e defensivos agrícolas, redução na emissão de gases promotores do aumento da temperatura do ambiente, visando a maior sustentabilidade dos sistemas produtivos (CARVALHO et al., 2010; JAKELAITIS et al., 2010; BORCHI et al., 2013; CRUSCIOL et al., 2013; 2014; COSTA et al., 2015a; 2016; 2017; CALONEGO et al., 2017; FRANZLUEBBERS e STUEDEMANN, 2014; GARCIA et al., 2016; MATEUS et al., 2016; PARIZ et al., 2016; 2017a,b).

Uma das principais limitações da produção agrícola em regiões tropicais com invernos secos, como o Cerrado Brasileiro, é a baixa produção de culturas e o acúmulo de palha durante o período de outono até a primavera, devido às condições climáticas desfavoráveis, especialmente a baixa disponibilidade de água (CRUSCIOL et al., 2012). Como alternativa para recuperação das pastagens e solos

degradados nessas regiões, iniciou-se o consórcio de culturas graníferas (milho, sorgo, milheto, arroz e soja) com forrageiras tropicais, principalmente do gênero *Urochloa* (syn. *Brachiaria*), em SIPA (KLUTHCOUSKI; YOKOYAMA, 2003; KLUTHCOUSKI et al., 2007). Tal técnica antecipa a formação da pastagem para pastejo, e ainda, formação de palhada para a continuidade do SSD (PARIZ et al., 2011).

Uma definição consensual de SIPA proposta por pesquisadores da Embrapa Gado de Corte, Embrapa Cerrados, Embrapa Milho e Sorgo e Embrapa Arroz e Feijão, que avaliam esses sistemas é: “Integração lavoura-pecuária são sistemas produtivos de grãos, carne, leite, lã, e outros, realizados na mesma área, em plantio simultâneo, sequencial ou rotacionado, onde se objetiva maximizar a utilização, os ciclos biológicos das plantas, animais, e seus respectivos resíduos, aproveitar efeitos residuais de corretivos e fertilizantes, minimizar e otimizar a utilização de agroquímicos, aumentar a eficiência no uso de máquinas, equipamentos e mão-de-obra, gerar emprego e renda, melhorar as condições sociais no meio rural, diminuir impactos ao meio ambiente, visando a sustentabilidade” (MACEDO, 2009).

Embora seja um sistema que apresenta inúmeros benefícios para a propriedade rural, é necessário considerar os desafios para o desenvolvimento do manejo racional destes sistemas agrícolas, que é a inclusão de técnicas e processos que beneficiem a manutenção e melhoria das características físicas, químicas e biológicas dos solos, da produção de alimentos, energia e fibras. A inclusão de vegetais, com a finalidade de utilização como adubação verde em sistemas agrícolas é essencial para a manutenção e a qualidade do solo, já que adicionam nitrogênio ao solo e o protege contra a ação dos agentes erosivos, além de promoverem a ciclagem de nutrientes no sistema.

Nos sistemas de produção de lavouras, tanto o precedente cultural braquiária quanto a sua palhada de cobertura do solo têm mostrado vantagens incontestáveis para a produção vegetal, reduzindo, principalmente, a necessidade de defensivos agrícolas (KLUTHCOUSKI et al., 2006; 2007). As vantagens apresentadas pela introdução de espécies forrageiras aos sistemas produtivos são diversas. Pode-se destacar que os sistemas radiculares destas espécies exploram maior volume de solo e reciclam mais eficientemente os nutrientes (COSTA et al., 2014; 2015, PARIZ et al., 2011; 2017a). Além disso, aumentam a atividade biológica do solo,

favorecendo a elevação do teor de matéria orgânica, podendo também reduzir a erosão (SALTON et al., 2002; SALTON et al., 2014).

Recentemente, de acordo com a FAO (2010, 2017), o SIPA foi reconhecido como alternativa para intensificação sustentável da produção agropecuária, pois estes sistemas produtivos reúnem diversos atributos que visam a melhoria em sistemas de produção de alimentos. Os SIPA podem ser utilizados com sucesso em pequenos e em grandes estabelecimentos rurais (CARVALHO et al., 2014). No caso de grandes áreas, a produção animal geralmente é representada por bovinos de corte, e a produção vegetal é constituída por culturas altamente mecanizadas, como a soja, por exemplo. Já em propriedades que não dispõem de extensas áreas agrícolas, a produção animal, em geral, é representada por bovinos destinados à produção de leite e, em alguns casos, por ovinos e caprinos para produção de carne (AMBROSI et al., 2001; FONTANELI et al., 2009).

A rotação de culturas utilizando-se espécies forrageiras, e mais especificamente a presença do animal em pastejo em ciclos entre culturas, pode trazer um componente de diversidade ao sistema de produção que não se atinge apenas utilizando-se o SSD. A presença do animal em pastejo modifica as rotas e a dinâmica da ciclagem de nutrientes no sistema, beneficiando a cultura em sucessão quando a intensidade de pastejo é manejada adequadamente, respeitando-se a altura ideal de entrada e saída dos animais, de acordo com cada espécie vegetal (CARVALHO et al., 2005).

O aumento da renda por área quando comparado a sistemas não integrados é enfatizado por vários pesquisadores (AMBROSI et al., 2001; FONTANELI et al., 2009; COSTA et al., 2012b, 2015b; PARIZ et al., 2009). Isso ocorre devido ao uso contínuo das áreas agrícolas, ao aumento de rendimento vegetal e/ou animal (ASSMANN et al., 2003; PARIZ et al., 2017b, c) e à redução de custos de produção ocasionados pelas vantagens biológicas. Em pesquisa realizada por Herrero et al. (2010), os autores enfatizam que o futuro da alimentação do planeta está diretamente relacionado com a adoção de tecnologias de intensificação sustentável que promovam ganhos de eficiência para se produzir mais alimentos sem que se use mais área, água ou outros insumos. Entretanto, o total da área com esses sistemas sendo utilizados no Brasil é de difícil estimativa, porém, sua importância e ritmo de expansão são amplamente reconhecidos (CARVALHO et al., 2006).

Uma prática atual que está sendo cada vez mais utilizada em SIPA, é a rotação ou sucessão de culturas de verão, como soja, milho, feijão comum (*Phaseolus vulgaris*) ou arroz (*Oryza sativa*) com gramíneas de pastagem anual de inverno, como aveia (*Avena*) e azevém (*Lolium multiflorum*) (MORAES et al., 2014a, b). A sobressemeadura de aveia no inverno apresenta grande impacto econômico e operacional no sistema de produção, com diminuição da necessidade de alimentos concentrados e área para produção de volumosos (TUPY et al., 2006).

Em pesquisa realizada por Taffarel et al. (2010), os autores demonstraram que a sobressemeadura de forrageiras de inverno, dentre elas a aveia, em pastagem de capim-marandu, proporcionou aumento na produção de forragem no período de entressafra. Dessa forma, em áreas formadas com espécies perenes de clima tropical, essa sobressemeadura é uma opção a ser considerada, por elevar a quantidade e qualidade da forragem em áreas de pastejo (MOREIRA et al., 2006). No sul e centro-sul do Brasil, regiões com clima mais ameno, a sobressemeadura de aveia após soja e milho é uma alternativa viável para aumentar a produção de forragem e carne no período de inverno/primavera (LOPES et al., 2008).

Assim, além dos benefícios do SIPA aos sistemas de produção comumente utilizados, pode-se ressaltar que as forrageiras cultivadas são importantes também para o estabelecimento do SSD no verão. Os trabalhos com SIPA visando à produção de forragem de qualidade, anterior à semeadura de culturas anuais são de grande importância (BORGHI et al., 2013; COSTA et al., 2012a; 2014; 2016; 2017; MATEUS et al., 2016; PARIS et al., 2011, 2017a, b), visto que o uso dos resíduos destas plantas atuam na proteção dos solos, garantindo, de maneira geral, melhor desenvolvimento das culturas.

Portanto, a utilização da consorciação/sucessão de culturas é um dos meios para se elevar a produtividade de sistemas de produção, principalmente em regiões tropicais, devido aos efeitos benéficos que tal prática proporciona sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, tendo ainda, a vantagem de baratear o custo da renovação das pastagens e ofertar alimento para os animais no período de entressafra da forrageira, tornando os sistemas de produção mais sustentáveis.

## 2.2 Sistema Santa Brígida de produção agropecuária

De modo geral, existem várias modalidades de SIPA nos mais variados ambientes de produção. A escolha de determinada espécie vegetal para cultivo em consórcio, rotação de culturas e até mesmo de espécies animais a serem utilizados no sistema, depende da região e, principalmente, do nível de tecnologia que será adotada pelo produtor rural. Neste sentido, os sistemas produtivos em SIPA visam além da maior diversificação e rentabilidade da atividade agrícola, a recuperação dos solos e pastagens degradados ou em processo de degradação.

Dentre as modalidades de SIPA, o Sistema Santa Brígida é a alternativa mais recente, e consiste no consórcio de culturas anuais com adubos verdes como o feijão-guandu (*Cajanus cajan*) e a crotalária (*Crotalaria spectabilis*) (OLIVEIRA et al., 2011). Estas espécies, em associação com bactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico (N<sub>2</sub>), proporcionam inúmeros benefícios ao ambiente de cultivo, uma vez que o N<sub>2</sub> fixado pode ser disponibilizado às culturas cultivadas na mesma área.

Ao longo dos anos de cultivo na mesma área agrícola, o consórcio de espécies gramíneas pode comprometer a sustentabilidade do SIPA por causar a deficiência de nitrogênio no solo (GARCIA et al., 2016). Assim, o desenvolvimento de sistemas sustentáveis de produção sob semeadura direta (SSD) são necessários, especialmente se combinado com estratégias eficientes de manejo de solo e planta, visando melhorar de uma maneira geral, a produção das culturas e dos animais na propriedade rural (PARIZ et al., 2017a, b).

Neste contexto, a produção de silagem de milho consorciada com espécies leguminosas pode ser uma alternativa interessante para uma maior diversificação das atividades agrícolas nas regiões tropicais (BALDÉ et al., 2011). Quando uma gramínea é incluída no consórcio de milho x leguminosa, existe a vantagem da formação de pastagem posterior a colheita de grãos, sendo que esta pastagem pode apresentar melhor qualidade nutricional, devido à fixação de nitrogênio previamente realizada pela leguminosa.

O aumento da demanda por manejos conservacionistas nos sistemas de produção atuais, também aumentou a preocupação com possíveis perdas de fertilizantes, principalmente os nitrogenados, que são os mais demandados pelas plantas, por isso, há a procura por alternativas que visem sua maior eficiência ou que supram sua necessidade via fixação biológica de nutrientes (YAN et al., 2014).

Dentre os nutrientes de maior importância nos sistemas de produção, o nitrogênio (N) é o que mais limita o desenvolvimento e a produtividade da maioria das culturas. É também o nutriente absorvido em maiores quantidades, especialmente pelas gramíneas, entre as quais, destacam-se as espécies utilizadas como pastagens. A deficiência de N nas culturas é a mais frequente, principalmente quando o manejo da adubação e ciclagem de nutrientes é realizado de forma incorreta e deficiente.

Em condições de cultivo adversas, principalmente aquelas relacionadas ao baixo teor de matéria orgânica (MO), umidade e textura do solo, época e modo de aplicação do fertilizante, podem ocorrer perdas desse nutriente por volatilização, lixiviação e desnitrificação. Em decorrência disso, a eficiência no uso de N pelas plantas no manejo convencional do solo tem sido da ordem de 50% a 60% (KLUTHCOUSKI et al., 2006).

Neste sentido, a utilização de espécies de adubos verdes cultivados em consórcio com culturas produtoras de grãos e pastagens, como o preconizado pelo sistema Santa Brígida, vem a auxiliar na maior disponibilização deste nutriente, uma vez que a maioria das espécies de leguminosas utilizadas como adubos verdes, tem a capacidade de se associarem com bactérias fixadoras de N atmosférico (OLIVEIRA et al., 2011), visto que os sistemas consorciados (SIPA) ainda são limitados pela carência de N, com alta dependência do uso de adubo nitrogenado para o sucesso da produção (ROSOLEM et al., 2011).

A adição de nitrogênio no solo a partir da atmosfera, juntamente com o nitrogênio disponibilizado pela decomposição e mineralização da matéria orgânica podem contribuir, ainda que de maneira insuficiente, no atendimento das exigências do elemento pelas espécies forrageiras. O acúmulo de matéria orgânica no solo e a fixação biológica de N atmosférico caracterizado nestes sistemas, auxiliam na maior permanência dos nutrientes no solo fazendo com que os nutrientes não se percam através dos processos de lixiviação e erosão (BUSCHBACHER, 1987). Torna-se importante esclarecer ainda, que os animais utilizados nestes sistemas de produção, devolvem ao solo, via fezes e urina, cerca de 70 a 95% dos nutrientes que ingerem dependendo da qualidade da forragem ingerida e da categoria, idade e condição corporal dos animais (RUSSELLE et al. 2007).

O objetivo do Sistema Santa Brígida é inserir os adubos verdes no sistema de produção, de modo a permitir um aumento do aporte de nitrogênio no solo, via

fixação biológica do nitrogênio atmosférico, sendo que este consórcio não deve afetar a produção de grãos de milho. De acordo com Heinrichs et al. (2005) e Oliveira et al. (2011), a utilização de espécies leguminosas em consórcio com o milho tem apresentado resultados produtivos positivos.

Outro benefício destes sistemas de produção, é que a cultura cultivada em sequência em sistema de rotação de culturas, pode se beneficiar do nitrogênio proveniente das leguminosas (ALVES et al., 2005; BRITO et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2011), permitindo a redução no fornecimento de nitrogênio mineral ao longo dos anos, proporcionando economia nos custos com a aquisição destes insumos. Pode-se citar ainda, como vantagens desse sistema, a diversificação das palhadas para o SSD, o que torna essa prática mais sustentável, considerando-se a melhoria nos teores nutricionais no solo, o que pode beneficiar ao sistema de cultivo como um todo (OLIVEIRA et al., 2011).

Assim, pode-se considerar que a manutenção da qualidade do solo é um dos fatores-chave para se atingir a sustentabilidade de um sistema de produção, principalmente em regiões tropicais. O aporte de matéria orgânica é considerado um dos principais indicadores de sustentabilidade e qualidade ambiental em agroecossistemas (FRANZLUEBBERS, 2002). Sendo assim, a utilização destes sistemas consorciados de produção agrícola, inclusive com maior taxa de fixação biológica de N atmosférico, pode auxiliar na economia com utilização de fertilizantes minerais e melhoria da qualidade química, física e biológica do solo, proporcionando maior produtividade das culturas (GARAY et al., 2004).

### **2.3 Estabelecimento de pastagens consorciadas com o milho e/ou leguminosas em SIPA**

Os sistemas produtivos em regiões tropicais, de maneira geral, têm se caracterizado nas últimas décadas, pela intensificação do uso dos solos e pastagens na região do Cerrado, principalmente adotando-se práticas inadequadas de manejo para a agropecuária, o que pode provocar queda da qualidade do solo e utilização de pastagens de má qualidade e insuficientes para a demanda de alimentação de ruminantes.

Além da degradação do solo, o uso de espécies não adequadas às condições locais, baixo estabelecimento de plantas antes do início do pastejo, perda da

fertilidade do solo em razão da alta extração de nutrientes pelos animais ao longo dos anos sem reposição, dentre outros, fazem parte dos fatores que contribuem para a degradação de pastagens (HUNGRIA et al., 2016).

Recentemente, a utilização de espécies forrageiras e leguminosas consorciadas com a cultura do milho tem sido cada vez mais utilizada, com resultados positivos para o milho (HEINRICHS et al., 2005; NUNES et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2011; GARCIA et al., 2016). As vantagens apresentadas pela introdução de espécies forrageiras aos sistemas produtivos são diversas. Pode-se destacar que os sistemas radiculares destas espécies exploram maior volume de solo e reciclam mais eficientemente os nutrientes (ROSOLEM et al., 2011; COSTA et al., 2014; CALONEGO et al., 2017). Além disso, podem aumentar a atividade biológica do solo, favorecendo a elevação do teor de matéria orgânica, com melhorias na qualidade do solo (FRANZLUEBBERS et al., 2002; CASTRO et al., 2015; COSTA et al., 2015a).

As forrageiras do gênero *Urochloa* são consideradas como excelentes materiais para a cobertura do solo no SSD, além de se destacarem devido à facilidade de implantação, uma vez que são multiplicadas por sementes. A rotação e consorciação de culturas pode ainda favorecer a quebra do ciclo de pragas e doenças, além de diminuir a incidência de plantas daninhas na área de cultivo, o que resulta em maior produção das culturas e redução dos custos de produção. Nestes sistemas produtivos, existe maior diversificação da produção agrícola e pecuária na propriedade rural, o que pode gerar maior rentabilidade ao produtor.

O processo de recuperação de pastagens degradadas, visando a melhoria nutricional do pasto por meio do consórcio de culturas graníferas e forrageiras é realizado adotando-se os SIPA. Estes sistemas produtivos, podem produzir até 3 Mg ha<sup>-1</sup>; 5 Mg ha<sup>-1</sup> e 3 Mg ha<sup>-1</sup> de arroz, milho e sorgo em consórcio com pastagens, respectivamente, em que estas permanecem implantadas no período de entressafra, caracterizado pela escassez de alimentos volumosos aos animais (OLIVEIRA et al., 2011).

Na consorciação de milho ou sorgo com espécies forrageiras tropicais, Kluthcouski et al. (2006), verificaram que além da competição exercida pelo consórcio entre as culturas não decrescer a produtividade de grãos dessas espécies, o produtor pode produzir uma pastagem para o período seco para cerca de 2 unidades animal (UA) por hectare. A média brasileira para ocupação animal por área

é em torno de 0,5 UA ha<sup>-1</sup>, com produção de boi a pasto no período mais crítico do ano, em termos de oferta de forragem. Tal fato demonstra que seria possível alimentar uma quantidade de bovino de 25 milhões de UA, se utilizássemos apenas a área de produção de milho no país (12,5 milhões ha). Além disso, essas pastagens podem servir para formação de uma palhada para cobertura do solo para continuidade e manutenção do SSD na produção de grãos na safra subsequente (KLUTHCOUSKI et al., 2006; 2007).

O consórcio entre gramíneas e leguminosas pode favorecer a ciclagem de nutrientes nos sistemas de produção. Nas áreas que hoje são utilizadas para produção de milho e sorgo, se fossem praticados a consorciação com leguminosas, seria possível em cada hectare, manter, temporariamente na palhada de cobertura, cerca de 90 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio com guandu-anão ou crotalária (KLIEMANN et al., 2006; CALVO et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2011). De acordo com Giacomini et al. (2004), o consórcio entre espécies gramíneas e leguminosas visa produzir fitomassa com relação C/N intermediária, proporcionando cobertura do solo por mais tempo e melhor sincronia entre oferta e demanda de N para as culturas comerciais.

Assim, fica evidenciado que a decomposição dos resíduos das culturas graníferas e das leguminosas pode elevar o aporte de N no solo e demais nutrientes, de modo que a quantidade de fertilizante nitrogenado no cultivo subsequente seja reduzida ao longo do tempo (KLUTHCOUSKI et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2011).

De acordo com Kluthcouski et al. (2006), Borghi; Crusciol (2007) e Borghi et al., (2013), a implantação da forrageira via consórcio com milho, sorgo ou arroz, na época de melhor disponibilidade hídrica (verão), viabiliza a produção de fitomassa no período de estiagem em regiões tropicais. Além disso, estes autores verificaram que a produção da pastagem de primeiro ano é elevada e as plantas permanecem verdes e fotossinteticamente ativas durante praticamente todo o ano. Com a adoção desta prática, toneladas de carbono podem ser fixadas na rotação de espécies graníferas e forrageiras, sendo obtidas altas produtividades de culturas semeadas em sucessão à pastagem (KLUTHCOUSKI et al., 2006; JAKELAITIS et al., 2010; PARIZ et al., 2011, 2017a).

Também podem-se citar outros benefícios como a reciclagem de nutrientes (CASTRO et al., 2015; COSTA et al., 2014; 2015a), visto que o sistema radicular das gramíneas tem capacidade de extrair nutrientes das camadas mais profundas do solo, que por sua vez traz benefícios físicos e biológicos na estrutura dos agregados

e na descompactação do solo (CALONEGO et al., 2017). Segundo Vilela et al. (2001), o método mais prático de manipular a estrutura do solo é a inclusão de espécies forrageiras no sistema, que também oferece os benefícios inerentes a rotação de culturas.

#### **2.4 Formação de palhada para o SSD e ciclagem de nutrientes**

Uma das estratégias mais eficientes para se minimizar as perdas de nutrientes em sistemas intensivos de produção agrícola, é manter-se as áreas constantemente vegetadas, com produção de palhada suficiente para a adequada cobertura do solo (CALVO et al., 2010; PARIZ et al., 2011). Os SIPA vêm cada vez mais atendendo aos requisitos de sustentabilidade ambiental, uma vez que se encaixam na maioria das premissas básicas para manter a qualidade do solo, adotando-se sistemas conservacionistas, com vistas em aumento na produtividade das culturas e animais (FAO, 2010; MATEUS et al., 2016; PARIZ et al., 2016, 2017a, b, c).

Assim, a proteção da superfície do solo é essencial para a manutenção das propriedades físicas, químicas e atividade de microrganismos que, uma vez presentes na matéria orgânica, promovem a liberação de compostos contribuindo para a absorção destes nutrientes pelo sistema radicular das plantas. Entretanto, a manutenção da palhada em quantidade e qualidade satisfatórias em condições edafoclimáticas de regiões tropicais podem ser limitadas.

Dentre as opções de se obter palhada para o SSD, os SIPA são os mais viáveis, principalmente em condições tropicais, como o Cerrado brasileiro. Neste sistema busca-se a preservação do solo e da água, recursos naturais que não podem ser vistos separadamente. O SSD é caracterizado pela manutenção, durante o ano todo, de plantas em desenvolvimento e de raízes. As plantas promovem a cobertura permanente do solo, por meio de sua parte aérea (viva) ou de seus resíduos vegetais (cobertura morta ou palha). Esta palha sobre a superfície, protege o solo contra o impacto das gotas de chuva, reduzindo a desagregação e o selamento da superfície do solo, garantindo maior infiltração de água e menor erosão.

Várias culturas têm sido utilizadas e testadas para cobertura de solo, rotação, e pastejo no outono-inverno, e entre as mais promissoras estão o milho, o milheto, o sorgo granífero e o forrageiro, o nabo forrageiro e as gramíneas forrageiras tropicais, consorciadas ou não, sobretudo as do gênero *Urochloa* (KLIEMANN et al., 2006;

CALVO et al., 2010; JAKELAITIS et al., 2005; 2010; PARIZ et al., 2011; COSTA et al., 2014, 2015). A prática da rotação de culturas promove maior diversidade biológica e melhor redistribuição e aproveitamento de nutrientes no solo, proporcionando maior sustentabilidade do sistema de produção (CALEGARI, 2000).

Os resíduos vegetais provenientes das culturas anteriores contêm macro e micronutrientes em formas orgânicas lábeis, que podem se tornar disponíveis para a cultura subsequente, mediante a mineralização, contribuindo para redução na utilização de fertilizantes químicos ao longo dos anos de cultivo (CALEGARI, 2004; CARVALHO et al., 2004).

Uma das principais características que tem conferido sucesso às gramíneas perenes em SSD em regiões de inverno seco é a sua maior persistência sobre a superfície do solo (PARIZ et al., 2011; COSTA et al., 2014; 2015a). Assim, a utilização de espécies com relação lignina/N mais alta, como é o caso de gramíneas, proporciona decomposição mais lenta da palhada sobre a superfície do solo, e processos como a imobilização, mineralização e lixiviação são alterados.

Esses consórcios também representam diversificação de palhadas de cobertura do solo para o SSD, visto que a utilização de espécies com alta relação carbono/nitrogênio (C/N) pode imobilizar temporariamente o nitrogênio (N) no solo. Algumas espécies de leguminosas têm sido avaliadas por diversos autores quanto à produção de fitomassa e fornecimento de nutrientes ao solo, quando cultivadas em consórcio com milho ou em monocultivo (HEINRICHS et al., 2005; CARNEIRO et al., 2008; CALVO et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2011), tendo apresentados resultados positivos.

Segundo Silveira et al. (2005), as leguminosas desempenham papel fundamental como fornecedoras de nutrientes quando o SSD está estabilizado, uma vez que as plantas dessa família têm a vantagem de prontamente disponibilizar nutrientes para culturas sucessoras, em virtude da rápida decomposição dos seus resíduos, em virtude de sua menor relação C/N.

Em pesquisa realizada por Borkert et al. (2003), os autores verificaram que no caso do nitrogênio (N), que é muito móvel no solo e volatiliza-se facilmente, estima-se que de 60% a 70% do total disponível nos sistemas de produção estejam contidos na biomassa vegetal, e a reciclagem promovida pelas espécies de cobertura é muito expressiva no suprimento nutricional das culturas comerciais.

De acordo com Calvo et al. (2010), a disponibilização de N para as lavouras depende da natureza e quantidade do nutriente no solo, da relação carbono/nitrogênio (C/N) dos restos vegetais, do grau de contato da palhada com os colóides do solo, assim como das condições climáticas (SILGRAM e SHEPHERD, 1999). Portanto, no que se refere à participação das plantas de cobertura na melhoria dos sistemas produtivos e produção de palhada para manutenção e continuidade do SSD, é primordial escolher espécies com elevada capacidade de acumular N na fitomassa, seja pela fixação de N<sub>2</sub> atmosférico, como no caso das leguminosas, seja pela absorção do nutriente no solo, ou por ambas em conjunto (OLIVEIRA et al., 2002).

Além disso, a elevação dos níveis de MO e a melhoria da qualidade física do solo com a introdução das pastagens em áreas agrícolas com níveis adequados de fertilidade, indicam que sistemas consorciados de produção agrícola tem potencial para reduzir o impacto ambiental das atividades agrícolas, ao reduzir as emissões gases, com conseqüente aumento da estabilidade de produção das culturas anuais e melhora do aproveitamento da água e dos nutrientes (CASTRO et al., 2015; COSTA et al., 2015).

Ao avaliarem as taxas de acúmulo de carbono em diferentes sistemas de uso e manejo do solo no Cerrado, Salton (2005) e Salton et al. (2011), observaram que os maiores estoques de carbono estão relacionados à presença de forrageiras, o que resulta na seguinte ordem decrescente de estoques de carbono no solo: pastagem permanente > ILP sob SSD > lavoura em SSD > lavoura em cultivo convencional. Resultados obtidos por Carvalho et al. (2009), na região do Cerrado, também são indicativos de que se pode aumentar muito a taxa de acúmulo de carbono com a conversão do SSD para SIPA sob SSD.

## **2.5 Qualidade química e física do solo em SIPA**

O uso intensivo de áreas agrícolas em regiões tropicais para a produção agropecuária, aliado ao manejo inadequado do solo, tem causado a degradação destes, com conseqüente diminuição em produtividade das culturas. Assim, há a necessidade da utilização de sistemas com bases conservacionistas, como é o caso do sistema semeadura direta (SSD), com a rotação de culturas e mais recentemente, os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA).

De maneira geral, os solos característicos destas regiões, como o Cerrado brasileiro, são naturalmente ácidos, possuem baixa fertilidade, baixa reserva mineral e possuem matéria orgânica de baixa atividade (SANO et al., 2008; SANTOS et al., 2008). Em contrapartida, a maioria destes solos são profundos e possuem elevada estabilidade de agregados. Sendo assim, a capacidade produtiva desses solos é reduzida, porém o seu potencial é elevado para produção agrícola, desde que sejam corrigidas as limitações nutricionais e adotados os manejos adequados que visem além de aumento na produtividade das culturas, melhorias também na qualidade do solo (KLUTHCOUSKI et al., 2006; CASTRO et al., 2015; COSTA et al., 2015; CRUSCIOL et al., 2016; PARIZ et al., 2017a).

Alguns problemas ocorrentes em pastagens, principalmente no cerrado, tais como a degradação física, química e biológica do solo, aliados à escassez de água, acabam gerando as seguintes consequências: limitações ao desenvolvimento do sistema radicular; maior susceptibilidade à erosão; desequilíbrio biológico e ecológico e aumento da incidência de insetos, patógenos e plantas daninhas. Esses fatores, quando combinados, geram a perda de solo e de seus nutrientes, promovendo, juntamente com a erosão eólica e hídrica, sua compactação e redução da infiltração de água. Todo este quadro pode-se traduzir na baixa sustentabilidade agrícola local, com implicações diretas sobre a instabilidade dos sistemas de produção (SOARES FILHO et al., 1992; CORSI, 1998).

Em áreas degradadas, a utilização de pastagens e lavouras consorciadas proporciona a melhoria das propriedades edáficas do solo, pela presença de palha e raízes da pastagem, aumentando os teores de carbono e melhorando significativamente as condições de aeração e capacidade de infiltração de água, além da produção de pasto e forragem para a alimentação animal na estação seca do ano (LOSS et al., 2011).

Fica evidente a necessidade da utilização mais racional dos recursos naturais existentes, o que será possível somente através de uma melhor compreensão do ecossistema de pastagens, para que práticas de manejo de sistemas de produção animal possam ser idealizados e implementados sem colocar em risco sua sustentabilidade e produtividade (SBRISSIA; SILVA, 2001).

Outra estratégia para melhorar a qualidade do solo e o aumento da produtividade das culturas, é praticar a semeadura em rotação de culturas sob o sistema de semeadura direta (SSD). Este sistema possui fundamental importância

na agricultura de conservação, ocupando primeiro lugar entre as tecnologias agropecuárias sustentáveis (LANDERS, 2007). A eficiência deste sistema fundamenta-se na adequada cobertura do solo durante todo o ano, fornecendo resíduos culturais, que constituem uma importante fonte de nutrientes aos sistemas agrícolas, uma vez que as plantas os absorvem das camadas subsuperficiais do solo, sendo posteriormente liberados na camada superficial pela sua decomposição (KRUTZMANN et al., 2013).

O sistema de rotação de culturas também é considerado um manejo conservacionista, pois consiste em alternar espécies de plantas ao longo dos anos na mesma área agrícola (DERPSCH et al., 2010). Desta forma, são evitados os períodos de pousio durante o ano. Para isso, é possível cultivar-se uma cultura de grãos na safra de verão, como o milho, o arroz, o feijão, a soja, o sorgo, entre outros, e na entressafra uma espécie de cobertura e/ou adubo verde, como o milheto, trigo, crotalária, pastagens, entre outros.

Os efeitos positivos do sistema de rotação de culturas sob SSD em regiões tropicais podem ser observados nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e na produção de culturas e são relatados em diversos trabalhos de pesquisa (ALEONI et al., 2010; CHURKA BLUM et al., 2013; GARCIA et al., 2013; ROSOLEM; CALONEGO, 2013; CAIRES et al., 2015; COSTA; CRUSCIOL, 2016; CRUSCIOL et al., 2016; JORIS et al., 2016; TIRITAN et al., 2016; CARMEIS FILHO et al., 2016, 2017; CALONEGO et al., 2017; PARIZ et al., 2016; 2017a, b, c).

A quantidade de matéria orgânica do solo tem sido considerada um fator importante para reduzir os níveis de Al livres. No entanto, os solos tropicais exibem um conteúdo de matéria orgânica naturalmente baixo. No SSD, a adição de resíduos orgânicos ajuda a qualidade química do solo, com diminuição da acidez (ZOBECK; SCHILLINGER, 2010; CRUSCIOL et al., 2016). Além disso, a adoção dessa prática conservacionista diminui a degradação do solo, produz menos emissões de gases de efeito estufa e reduz os impactos ambientais negativos (FRANZLUEBBERS, 2002; DIEKOW et al., 2005; CALONEGO; ROSOLEM, 2010; GARCIA et al., 2013; COSTA et al., 2015a; NASCENTE et al., 2015; RAPHAEL et al., 2016).

A importância da matéria orgânica (MO) na melhoria das propriedades físicas e químicas do solo é enfatizada em diversas pesquisas (FRANZLUEBBERS, 2002; CASTRO et al., 2015; COSTA et al., 2015; BONINI et al., 2017). De acordo com estes autores, a MO proporciona o aumento da porosidade (aeração) 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 por bactérias, fungos, algas, vírus e protozoários que atuam na sua decomposição.

Os efeitos promovidos pela adubação verde nas propriedades físico-químicas do solo são diversos. Entretanto, tal fato depende da espécie utilizada, do manejo realizado na biomassa vegetal, da época de plantio, do tempo de permanência dos resíduos vegetais no solo, das condições locais, da composição bioquímica e da interação entre todos esses fatores (ALCÂNTARA et al., 2000). Em trabalho realizado por Silva et al. (2002), é enfatizada a adequada época de corte das espécies utilizadas como adubos verdes nestes sistemas produtivos, sendo manejados, de preferência, após o florescimento e antes da frutificação para garantir a adição de uma boa quantidade de material vegetal ao sistema solo.

A melhoria da qualidade do solo é fato comprovado quando se é adotado os sistemas de produção conservacionistas em SIPA. Nestes sistemas ocorre um aumento nas concentrações de carbono orgânico no solo ao longo do tempo, devido ao crescimento contínuo de plantas na área, seja pastagem ou culturas para exploração vegetal, rotação de culturas, incremento da massa produzida em decorrência do pastejo e maior ciclagem de nutrientes (TRACY; ZHANG, 2008). O teor de carbono orgânico (matéria orgânica) é um atributo que pode servir de indicador de qualidade do solo (FRANZLUEBBERS, 2002; CASTRO et al., 2015), já que este auxilia diretamente na melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo.

O SSD tem sido frequentemente adotado nos últimos anos, e o resultado tem sido relacionado ao aumento gradativo do teor de matéria orgânica na camada mais superficial do solo, podendo contribuir para o aumento da atividade microbológica. Tal fato pode alterar a dinâmica dos nutrientes, especialmente do nitrogênio (N), uma vez que o N é o nutriente que mais limita o desenvolvimento, a produtividade e a produção de biomassa da maioria das culturas e está intimamente relacionado com o teor de matéria orgânica, tornando-o menos disponível para as plantas, em determinado período, em razão da imobilização. Porém, em áreas com mais tempo sob SSD, a mineralização do N tende a ser maior que a sua imobilização microbiana (ANGHINONI, 2007). Em condições adversas de ambiente, principalmente aquelas relacionadas ao baixo teor de matéria orgânica, umidade e textura do solo, época e

modo de aplicação do fertilizante, podem ocorrer perdas desse nutriente por volatilização, lixiviação e desnitrificação (MOTA et al., 2015).

Existem plantas que hospedam micro-organismos fixadores de nitrogênio atmosférico ( $N_2$ ) e essa associação é benéfica para ambos. Os microrganismos fixam o  $N_2$  e disponibilizam aos vegetais nas raízes, enquanto os vegetais suprem as necessidades dos organismos fixadores por meio da alocação de fotoassimilados. O fornecimento de N às culturas poderia ser viabilizado pela inoculação microbiana ou mediante cultivo consorciado com leguminosas, ou por meio dessas duas maneiras (OLIVEIRA et al., 2011; BRITO et al., 2011).

O manejo incorreto do solo pode provocar o declínio de produção das culturas de modo geral, tendo em vista que estes são decorrentes da degradação das propriedades físicas e da exportação dos nutrientes, bem como do esgotamento das reservas do solo. Assim, práticas conservacionistas, como as adotadas em SIPA e o correto uso da adubação podem beneficiar o sistema de produção (KLUTHCOUSKI et al., 2006; COSTA et al., 2015). De acordo com Vendrame et al. (2010), as práticas de manejo podem minimizar ou até mesmo eliminar tais problemas, tornando a grande parte dos solos cultiváveis.

As intensidades das alterações dos atributos do solo, principalmente dos físicos, podem variar de acordo com a textura, o teor de matéria orgânica (LARSON et al., 1980; SMITH et al., 1997), o teor de umidade do solo (CORREA; REICHARDT, 1995) e a biomassa vegetal sobre o solo (SILVA et al., 2000, 2003). 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.

Desta forma, os sistemas conservacionistas podem melhorar as condições físicas 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 e a maximização da utilização do solo (COSTA et al., 2015a; CALONEGO et al., 2017; PARIZ et al., 2017a).

Roth et al. (1991), constataram que manejos que mantêm o solo descoberto diminuem a estabilidade de agregados, causando selamento superficial, reduzindo a infiltração de água e, conseqüentemente, induzindo à enxurrada e à erosão. O fornecimento contínuo de material orgânico pela palhada 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 (CAMPOS; ALVES, 2008; BONINI et al., 2017).

Desta 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 (COSTA et al., 2015a). Portanto, torna-se necessária a adoção de práticas conservacionistas de manejo do solo e das culturas, tendo em vista principalmente, melhorá-lo química, física e biologicamente, principalmente quanto ao teor de matéria orgânica, criando condições favoráveis ao desenvolvimento agrícola (CAIRES et al., 2015; SILVEIRA; STONE, 2001; SANTOS et al., 2003; LOURENTE et al., 2010).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido durante o período de dezembro de 2013 a dezembro de 2015 na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA/UNESP) no município de Botucatu/SP nas coordenadas 22°51'01" S e 48°25'28" W, com altitude de 777 metros. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013), o solo da área experimental é um Latossolo Vermelho distrófico com 280, 90 e 630 g kg<sup>-1</sup> de areia, silte e argila, respectivamente.

#### 3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro tratamentos e quatro repetições, totalizando 16 parcelas experimentais de 12,5 m de largura e 25 m de comprimento (totalizando 225 m<sup>2</sup>).

Os tratamentos foram constituídos por duas modalidades de cultivo de milho para ensilagem no verão, sendo milho consorciado com capim-marandu (*Urochloa brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf cv. Marandu [syn. *Brachiaria* (Hochst. ex A. Rich.) R. D. Webster cv. Marandu]) e milho consorciado com capim-marandu e feijão-guandu cv. BRS Mandarin [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.]. Os dois tratamentos para produção de silagem no verão foram associados com mais dois tratamentos de inverno, ou seja, duas modalidades de semeadura de aveia-preta cv. EMBRAPA 29 (Garoa) (*Avena strigosa*), ou seja, a lanço (manual) e em linha (semeadora). Portanto, os tratamentos foram: i) consórcio de milhoxcapim-marandu seguido de sobressemeadura de aveia a lanço (MB+ALA); ii) consórcio de milhoxcapim-marandu seguido de sobressemeadura de aveia em linha (MB+ALI); iii) consórcio de milhoxcapim-maranduxfeijão-guandu seguido de sobressemeadura de aveia a lanço (MBG+ALA) e iv) consórcio de milhoxcapim-maranduxfeijão-guandu seguido de sobressemeadura de aveia em linha (MBG+ALI).

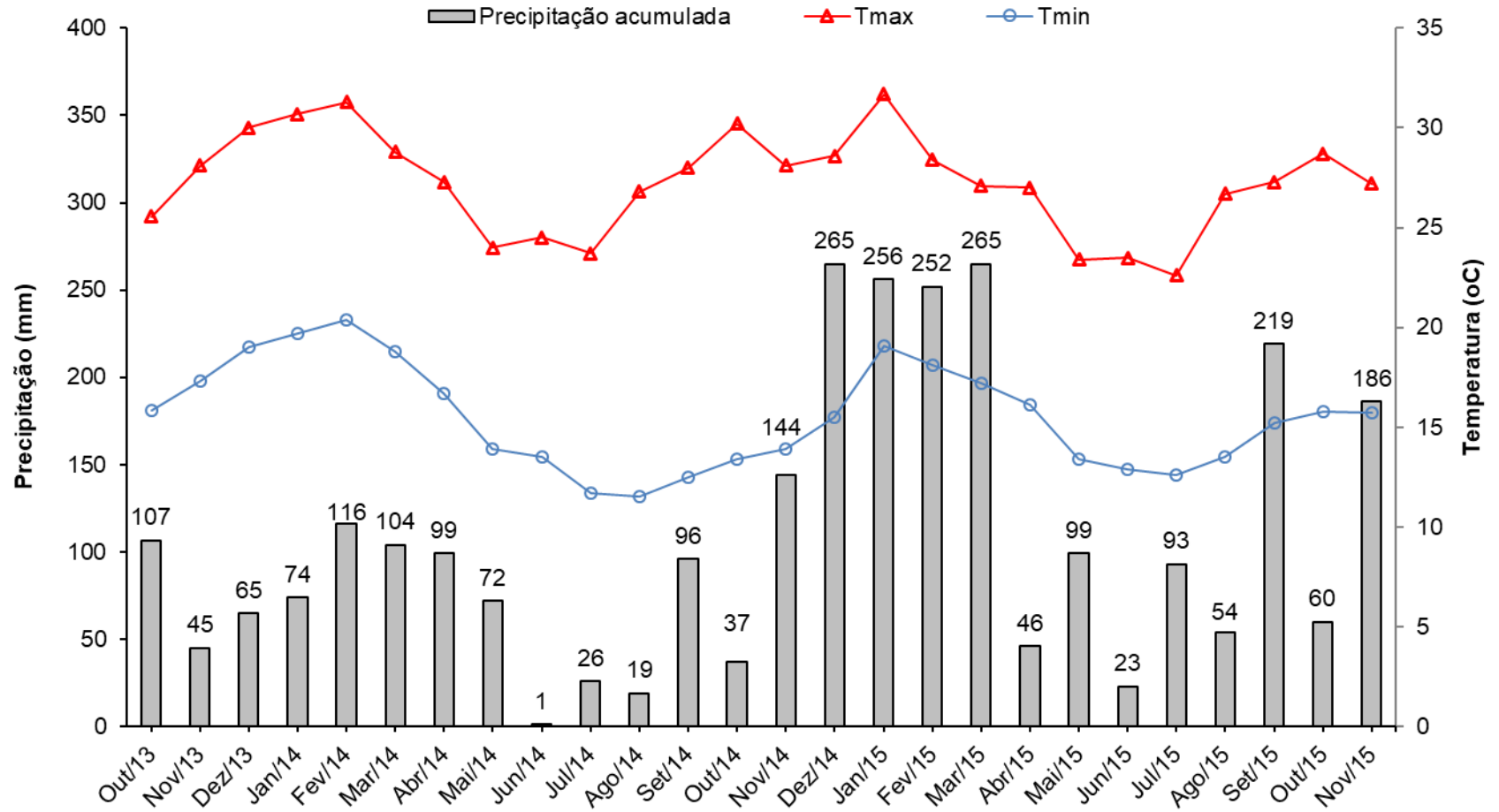
### **3.3 Características climáticas da área experimental e dados meteorológicos**

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 (ALVES et al., 2013).

Os dados climáticos foram obtidos na estação meteorológica do Departamento de Solos e Recursos Ambientais situada nas coordenadas geográficas 22°50'48" S e 48°26'06" W com altitude de 817,74 m e localizada a 1142 m de distância da área experimental. A precipitação anual histórica (média de 35 anos) para Botucatu é de 1501 mm, enquanto que, as médias históricas de outubro a março correspondem a 74,8% do total anual, com 1123 mm e os meses de abril a setembro correspondem a 25,2% do total anual, com 379 mm.

Os valores mensais acumulados registrados para precipitação pluviométrica, temperaturas máxima e mínima durante o presente experimento estão apresentados na Figura 1.

**Figura 1. Valores mensais acumulados para precipitação pluviométrica, temperaturas médias máxima (Tmax) e mínima (Tmin), durante o período experimental, nos meses de outubro de 2013 a novembro de 2015**



### 3.4 Histórico, instalação e condução do experimento

Até o ano de 2005 a área foi utilizada para produção de silagem de milho e sorgo, sendo que até outubro/2010, se encontrava em pousio, com predominância de capim-braquiariinha {*Urochloa decumbens* (Stapf) R. D. Webster cv. Basilisk [syn. *Brachiaria decumbens* Stapf cv. Basilisk]}. Nos anos agrícolas de 2010/2011 e 2011/2012 a área foi utilizada para produção de silagem de milho em consórcio com braquiárias na safra, com posterior sobressemeadura de aveia e pastejo por cordeiros entre os meses de agosto e novembro. No ano agrícola de 2012/2013 a área foi utilizada para produção de silagem de soja em consórcio com capim-aranã.

Em 20 de novembro de 2013 e 02 de dezembro de 2014, foi realizada a dessecação das plantas presentes na área experimental com a aplicação dos herbicidas Glyphosate [isopropylamine salt of N-(phosphonomethyl) glycine] e 2,4-D amine (2,4-Dichlorophenoxyacetic acid) nas doses de 1,44 kg ha<sup>-1</sup> do equivalente ácido e 0,67 kg do ingrediente ativo, respectivamente. Em 09 de dezembro de 2013, realizou-se aplicação sequencial do herbicida Glyphosate na dose de 1,08 kg ha<sup>-1</sup> do equivalente ácido. Em ambas aplicações, utilizou-se volume de calda de 200 L ha<sup>-1</sup>.

Antes da instalação do experimento, as características do solo foram determinadas conforme as metodologias descritas por Raij et al. (2001). Os resultados estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Características químicas do solo em duas profundidades na área experimental antes do início do experimento em setembro de 2013.

Prof. (m)	pH	MOS <sup>§</sup>	P <sub>(resina)</sub>	H+Al	K	Ca	Mg	CTC <sup>β</sup>	V <sup>o</sup> % <sup>ε</sup>
	CaCl <sub>2</sub>	g dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	-----	-----	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	-----	-----	-
0 - 0,2	5,1	38	12,2	41	1,0	31	15	89	53
0,2 - 0,4	4,8	38	5,5	59	0,7	21	11	93	36

<sup>§</sup>Matéria orgânica do solo; <sup>β</sup>Capacidade de troca catiônica; <sup>ε</sup>Saturação por bases.

Conforme Quadro 2, em 16 de dezembro de 2013 e 16 de dezembro de 2014 (primeiro e segundo anos agrícolas, respectivamente) foi realizada a semeadura do híbrido simples (HS) de milho 2B587 HX (precoce), na profundidade de 0,04 m, com espaçamento entrelinhas de 0,45 m e densidade de 80.000 sementes ha<sup>-1</sup> (3,6 sementes m<sup>-1</sup>), utilizando semeadora-adubadora para SSD dotada de mecanismo para abertura de sulco do tipo haste sulcadora.

Quadro 2. Informações sobre as cultivares, datas de semeadura, espaçamento entre linhas, densidade de semeadura, fertilização e data de colheita ou manejo para as espécies utilizadas nos sistemas de cultivo de 2013 a 2015

Cultivo	Cultivar	Semeadura	Espaçamento entre linhas	Densidade de semeadura	Adubação de base	Adubação cobertura	Data da colheita
Milho (Safrá)	2B587 PowerCore	16 Dez. 2013	0,45 m	3,6 sem m <sup>-1</sup>	36 kg N 126 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 72 kg K <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup>	150 kg N 37,5 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 150 kg K <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup>	25 Abr. 2014
	2B587 PowerCore	16 Dez. 2014	0,45 m	3,6 sem m <sup>-1</sup>	36 kg N 126 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 72 kg K <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup>	150 kg N 37,5 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 150 kg K <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup>	08 Abr. 2015
Forrageira (Safrá)	<i>U. brizantha</i> cv. Marandu	16 Dez. 2013	0,45 m	12 kg ha <sup>-1</sup>	-	-	25 Abr. 2014
	<i>U. brizantha</i> cv. Marandu	16 Dez. 2014	0,45 m	12 kg ha <sup>-1</sup>	-	-	08 Abr. 2015
Feijão-guandu (Safrá)	cv. IAC–Fava Larga	16 Dez. 2013	0,45 m	15 sem m <sup>-1</sup>	-	-	25 Abr. 2014
	cv. IAC–Fava Larga	16 Dez. 2014	0,45 m	15 sem m <sup>-1</sup>	-	-	08 Abr. 2015
Aveia preta (Entressafrá)	cv. Embrapa 29	05 Mai 2014	-	(Lanço) 120 kg ha <sup>-1</sup>	-	-	-
	cv. Embrapa 29	22 Abr. 2015	0,17 m	(Linha) 65 kg ha <sup>-1</sup>	-	-	-

Na parcela onde foi semeado o milho em consórcio com o capim-marandu e feijão guandu, primeiro semeou-se o feijão guandu na profundidade de 0,04 m e espaçamento de 0,45 m, utilizando-se a mesma semeadora-adubadora para SSD e 15 sementes por metro (aproximadamente 35 kg de sementes ha<sup>-1</sup>), conforme recomendação de Oliveira et al. (2011). Em seguida, nas entrelinhas, semeou-se o milho com capim-marandu.

O capim-marandu foi semeado na quantidade de 600 pontos de valor cultural (VC) ha<sup>-1</sup>, conforme recomendação de Pariz et al. (2009). As sementes de capim-marandu foram misturadas ao adubo de semeadura utilizando-se uma betoneira, minutos antes da semeadura, acondicionadas no compartimento de fertilizantes da semeadora-adubadora e depositadas na profundidade de 0,08 m. Em ambos os anos agrícolas (2013/2014 e 2014/2015), a adubação mineral nos sulcos de semeadura constou de 36, 126 e 72 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, respectivamente (450 kg ha<sup>-1</sup> do adubo formulado 08-28-16 + 2% de Ca, 2% de S e 0,5% de Zn), seguindo as recomendações de Cantarella et al. (1997).

A emergência plena das plântulas do milho no primeiro e segundo ano agrícola ocorreu em 27 de dezembro de 2013 e 23 de dezembro de 2014, respectivamente. A emergência plena das plântulas de feijão guandu nos dois anos agrícolas aconteceu em 02 de janeiro de 2014 e 28 de dezembro de 2014, respectivamente. O capim-marandu emergiu em 10 de janeiro de 2014 e 07 de janeiro de 2015 nos dois anos agrícolas, respectivamente.

Em todos os anos agrícolas não foi realizada aplicação de herbicida em pós-emergência da cultura do milho. Também não foi necessário amenizar o crescimento inicial do capim-marandu com subdose de herbicida gramínico, devido ao tempo diferente de emergência das plântulas de milho e do capim.

Em 15 de janeiro de 2014 e 13 de janeiro de 2015, quando as plantas de milho se encontravam no estágio vegetativo V4, com 50% das plantas com quatro folhas totalmente desdobradas (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000), foi realizada a adubação mineral de cobertura com aplicação manual, de 150, 37,5 e 150 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, respectivamente (750 kg ha<sup>-1</sup> do fertilizante mineral formulado 20-05-20). O adubo foi depositado próximo a linha do milho, sem incorporação, seguindo as recomendações de Cantarella et al. (1997) para a cultura do milho destinado à produção de silagem de planta inteira.

Em 25 de abril de 2014 e 08 de abril de 2015, realizou-se a colheita mecânica das plantas para ensilagem com colhedora de forragem modelo JF C-120 (12 facas) e plataforma de duas linhas em espaçamento reduzido de 0,45 m entrelinhas. A altura de corte foi de 0,45 m em relação à superfície do solo, no estágio de  $\frac{1}{4}$  de grão leitoso (grãos com 35% de umidade). O material colhido foi picado em partículas médias de 1,0 cm, os grãos foram cortados pelas facas da colhedora e o material foi armazenado em silo tipo “bag” de 1,50 m de diâmetro, com compactação de  $600 \text{ kg m}^{-3}$  de massa verde, para posterior suplementação dos cordeiros.

Em 05 de maio de 2014 e 22 de abril de 2015, realizou-se as duas modalidades de sobressemeadura da aveia-preta. Na semeadura em linha, as sementes foram depositadas na profundidade de 0,03 m, com espaçamento de 0,17 m e densidade de  $65 \text{ kg ha}^{-1}$  de sementes puras viáveis, utilizando-se semeadora-adubadora para SSD. Na semeadura à lanço, as sementes foram distribuídas manualmente sobre a superfície do solo na densidade de  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de sementes puras viáveis, incorporando-as ao solo com gradagem niveladora leve (discos totalmente fechados para revolvimento mínimo do solo). Nas duas modalidades de sobressemeadura da aveia-preta foram seguidas as recomendações de Adami; Pitta (2012). A emergência plena da aveia-preta nas duas modalidades de sobressemeadura ocorreu nos dias 09 de maio de 2014 e 27 de maio de 2015.

Após a colheita das plantas para ensilagem e sobressemeadura da aveia foram delimitados piquetes com cerca elétrica de seis fios e os animais tiveram livre acesso à água.

Nos dois anos agrícolas (2013/2014 e 2014/2015) a entrada dos cordeiros na área experimental ocorreu durante o período de julho a setembro. No primeiro ano experimental, foram utilizados 48 cordeiros machos cruzados, não castrados, Dorper x Texel x Ile de France com idade média de três meses e peso vivo inicial de  $27,0 \pm 3,2 \text{ kg}$ . No segundo ano experimental, foram avaliados 48 machos cruzados, não castrados, Poll Dorset x Corriedale com idade média de três meses, peso vivo inicial de  $24,4 \pm 3,4 \text{ kg}$ .

O método de pastejo foi o de lotação rotacionada com taxa de lotação fixa (44 e 55 cordeiros  $\text{ha}^{-1}$  no primeiro e segundo ano agrícola, respectivamente). O período de ocupação de cada piquete foi de três dias e o de descanso de 33 dias. A duração dos ciclos foram 36 e 33 dias no primeiro e segundo ciclo de pastejo, respectivamente, totalizando 69 dias de pastejo nos dois anos agrícolas.

O desempenho zootécnico dos animais foi avaliado pela Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Unesp de Botucatu, SP, como parte da parceria da presente pesquisa, e portanto, os dados zootécnicos não foram incluídos na presente tese.

### **3.5 Coletas de solo**

As coletas de solo foram realizadas nos meses de maio, após a colheita do milho para ensilagem, e em novembro, após o pastejo dos animais, nos anos de 2014 e 2015, totalizando 4 coletas de solo ao longo do período de condução do experimento. As coletas foram realizadas em trincheiras abertas em cada parcela totalizando 16 trincheiras. As trincheiras foram abertas com auxílio de mini retroescavadeira, enxadão e pá de ponta. As amostras foram retiradas na parede da trincheira nas camadas de 0,0 a 0,05 m; 0,05 a 0,1 m; 0,1 a 0,2 m; 0,2 a 0,4 m. As amostras de solo para fins de análises de fertilidade e física foram acondicionadas em sacos plásticos e encaminhadas para análise no laboratório de Relações Solo-Planta do departamento de Produção e Melhoramento Vegetal e Agricultura da FCA/UNESP, Botucatu (SP).

Foram retirados aproximadamente 2 kg de torrões indeformados, totalizando 64 amostras por época de avaliação, para análises de densidade do solo, densidade real, porosidade total, macro, microporosidade, estabilidade de agregados, resistência do solo à penetração e curva de retenção de água, foram coletadas.

Também foram coletadas amostras indeformadas, com auxílio de cilindros de inox, com 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro, em duplicata, totalizando 128 amostras. Uma porção das amostras (64) foram destinadas à determinação da curva de retenção de água no solo e porosidade do solo, e a outra porção, à determinação da resistência do solo à penetração. Os anéis foram envoltos em plástico filme e acondicionados em geladeira, objetivando-se preservar ao máximo a estrutura e umidade do solo.

As amostras de solo para análises químicas foram extraídas na quantidade de aproximadamente 0,5 kg de solo em cada camada. As amostras foram retiradas com auxílio de espátulas e régua para medição da profundidade de cada camada.

### 3.6 Análises físicas do solo

#### 3.6.1 Densidade do solo, densidade real, porosidade total, macroporosidade e microporosidade

A densidade do solo (DS) foi obtida através do método do anel volumétrico e a densidade real (partículas) através do método do balão volumétrico (EMBRAPA 1997). A porosidade total (PT) foi calculada através da equação 1 proposta por Embrapa (1997).

$$PT = 100 (a - b)/a \quad (1)$$

Onde:

a: densidade real;

b: densidade aparente;

A macroporosidade (MA) foi obtida no potencial matricial de -6 kPa na determinação da curva de retenção de água no solo que foi realizada de acordo com Embrapa (1997), utilizando-se aparelho extrator de Richards (KLUTE, 1986) com placas porosas de cerâmica para suportar pressão de 1 bar. A microporosidade (MI) foi obtida pela diferença entre PT e MA.

#### 3.6.2 Estabilidade de agregados

As amostras de solo foram acondicionadas em sacos plásticos e posteriormente pré-selecionadas 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. A distribuição dos agregados por tamanho foi obtida pelo método por via úmida (EMBRAPA, 1997).

Os agregados do solo pré-selecionados foram avaliados quanto à estabilidade de agregados via úmida, conforme Kemper; Chepil (1965), utilizando o aparelho de oscilação vertical (YODER, 1936). O aparelho, que movimentava verticalmente 4 conjuntos de peneiras imersos em água, consta de um motor elétrico acoplado a um redutor de velocidade, tendo uma polia com eixo excêntrico, com 30 ciclos por

minuto (MULLER, 2002). Ligado ao eixo excêntrico há uma haste vertical com a função de sustentar quatro jogos de peneira e de mergulhar cada jogo em um tanque contendo água.

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, sendo possível processar 2 amostras por vez, já que o aparelho contém 4 conjuntos de peneiras. O tamisamento mecânico em água foi realizado por 15 minutos.

Obtido o peso de 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. Calculou-se, também, o índice de estabilidade dos agregados (IEA), utilizando a equação 4 (CASTRO FILHO et al., 1998) e a porcentagem de agregados retidos na peneira de 2,0 mm.

Quanto maior for a porcentagem de agregados grandes, retidos nas peneiras com malhas maiores, maior será o DMP. O DMG representa uma estimativa da classe de agregados de maior ocorrência. O IEA representa a medida de agregação total do solo e não considera a distribuição por classe de agregados. Quanto maior a quantidade de agregados menores que 0,105 mm, menor será o IEA.

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

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

Onde:

$x_i$ : diâmetro médio das classes;

$w_i$ : proporção de cada classe em relação ao total;

$w_p$ : peso dos agregados de cada classe (g).

$$IEA = ((PAS - wp_{25}) / PAS) \times 100 \quad (4)$$

Onde:

PAS: peso da amostra seca;

wp25: peso dos agregados menores que 0,25 mm.

### **3.6.3 Resistência do solo à penetração**

A resistência do solo a penetração foi obtida após as amostras serem submetidas a -6,0 kPa no parêmetro extrator de Richards, descrito por Embrapa (1997).

Em seguida, essas amostras foram submetidas ao teste de resistência mecânica à penetração (RP), utilizando-se um penetrômetro de bancada da marca Marconi, modelo MA 933. Esse aparelho é 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 6 mm e com ponteira cônica com semiângulo de 30° e área da base de 0,1256 cm<sup>2</sup>, foi utilizada para penetrar as amostras.

A velocidade de deslocamento vertical da haste foi de 1,0 cm min<sup>-1</sup>, até a profundidade de 4,0 cm do anel metálico, com taxa de amostragem de 1 ponto s<sup>-1</sup>, obtendo-se um total de 180 valores. 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, são provenientes da porção intermediária longitudinal do anel, ou seja, foram desconsiderados 0,01 m do extremo superior e 0,01 m do extremo inferior.

### **3.6.4 Curva de retenção de água no solo e índice S**

A determinação da curva de retenção de água no solo (CRA) foi realizada de acordo com Embrapa (1997), utilizando-se aparelho extrator de Richards (KLUTE, 1986) com placas porosas de cerâmica para suportar pressões de 1,0, 5,0 e 15,0 bar.

As amostras indeformadas foram saturadas em bandejas plásticas com água até atingir 2/3 da altura dos anéis. Para evitar perda de solo, foi colocado no fundo de cada anel, um tecido de poliéster, que permite o fluxo normal da água entre a amostra de solo e a placa porosa. Após 72 horas de imersão das amostras, e com todos os poros do solo ocupados pela água, iniciou-se a drenagem das amostras,

submetendo-as às tensões de -3, -6, -10, -30, -100, -500 e -1500 kPa. A extração de água das amostras nas câmaras de Richards foi realizada por meio de compressor com capacidade para 20 bar.

Após extração da água com tensão de -1500 kPa e pesagem da amostra de solo, estas foram secas em estufa de circulação forçada, a 105 °C, por 48 horas, para em seguida serem determinados os pesos secos das amostras com volume de solo conhecido.

De posse da umidade volumétrica obtida em cada potencial matricial, a curva de retenção de água no solo foi determinada por meio de ajuste dos dados originais, utilizando o modelo expresso na equação 5, proposto por van Genuchten (1980), e o software SWRC 3.0 beta (Soil Water Retention Curve) desenvolvido por Dourado Neto et al. (1990). A equação considera o potencial mátrico ( $\Psi$ ), como variável independente e a umidade volumétrica ( $\theta$ ), como variável dependente. Os dados do conteúdo de água retido em cada tensão foram ajustados ao modelo de van Genuchten (1980). O software utilizado no ajuste do modelo foi o SWRC 3.0 beta (Soil Water Retention Curve).

$$\theta = (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) \cdot [1 + (\alpha\Psi)^n]^m + \theta_{\text{res}} \quad (5)$$

Onde:

$\theta$ : umidade volumétrica do solo em cada potencial matricial ( $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ );

$\theta_{\text{res}}$ : umidade volumétrica residual do solo no potencial matricial de -1500 kPa ( $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ );

$\theta_{\text{sat}}$ : umidade volumétrica do solo saturado ( $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ );

$\Psi$ : potencial matricial (KPa);

a, n, m são os coeficientes da equação.

Após o ajuste das curvas de retenção utilizando a modelo proposto por Genuchten (1980), foi possível determinar o índice S para cada curva de retenção de água no solo, de acordo com o modelo proposto por Dexter (2004), expresso na equação 6.

$$S = -n(\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) \cdot [1 + (1/m)]^{-(1+m)} \quad (6)$$

Onde:

S: coeficiente angular da curva de retenção de água no ponto de inflexão

$\theta_{res}$ : umidade volumétrica residual do solo no potencial matricial de -1500 kPa ( $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ );

$\theta_{sat}$ : umidade volumétrica do solo saturado ( $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ );

$n$ ,  $m$  são os coeficientes da equação 5.

### 3.7 Análises químicas do solo

As amostras de solo foram processadas no departamento de Produção e Melhoramento Vegetal da FCA/UNESP campus de Botucatu (SP). As amostras deformadas para análise de fertilidade foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de 2 mm e devidamente armazenadas.

Para avaliação da fertilidade, as amostras foram analisadas quimicamente para determinação de fósforo (resina), enxofre, cálcio, magnésio, potássio e enxofre conforme metodologia proposta por Raji et al. (2001).

Os teores de carbono (C) e nitrogênio (N), foram obtidos por meio de analisador elementar automático (Modelo TruSpec™ CHNS, da LECO®).

### 3.8 Coleta e análise de raiz

Foram retiradas em duplicata amostras de raízes contidas na linha e entre linha do milho visando obter uma amostra homogênea dentro da parcela. As coletas foram realizadas em maio de 2014, após a colheita do milho para silagem, e em novembro de 2015, antes da dessecação das plantas remanescentes. Foram retiradas amostras das camadas de 0,0 a 0,05 m; 0,05 a 0,10 m; 0,10 a 0,20 m; 0,20 a 0,40 m.

As raízes foram coletadas com auxílio de trado tubular de 0,05 m de diâmetro e que foram introduzidos no solo com auxílio de marreta. A porção de solo contendo as raízes foram acondicionadas em saco plástico e armazenadas em geladeira até que fossem processadas.

A porção de solo com as raízes foi lavada em água corrente para obtenção das raízes, estas foram armazenadas em potes plásticos, com solução de álcool a 50%, e acondicionados em geladeira a 5° C até o momento da análise.

As amostras para análises físicas e de raízes foram transportadas para o departamento de Recursos Naturais e Ciências do Solo da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp campus de Botucatu, São Paulo, onde foram analisadas.

As raízes foram analisadas obtendo-se imagem digitalizada por meio de scanner Epson Perfection V700 Photo Scanner de alta resolução (6400x9600 dpi) com Dual Lens System. As imagens foram automaticamente processadas pelo software WinRhizo. Foram obtidos comprimento por unidade de solo coletada (CR) e o diâmetro médio de raízes (DMR).

### **3.9 Produtividade de massa seca dos componentes vegetais da silagem na safra**

Durante a safra 2013/2014 e 2014/2015 as plantas de milho, capim-marandu e feijão-guandu contidas em cinco linhas centrais espaçadas em 0,45 m com 5 m de comprimento por parcela (11,25 m<sup>2</sup>) foram cortadas manualmente com auxílio de tesoura de poda. As plantas foram divididas em parte residual da colheita da silagem (da base da planta até 0,45 m de altura, ou seja, altura de colheita da plataforma da colhedora) e em parte aérea ensilada (acima de 0,45 m de altura).

Os materiais vegetais foram pesados e uma amostra representativa foi colocada em estufa de ventilação forçada de ar a 65°C por 72h para determinação do teor de matéria seca de cada fração. O somatório da massa seca dessas frações resultaram na produtividade de massa seca total ensilada e residual do processo de colheita, que foram extrapoladas para kg ha<sup>-1</sup>.

Os grãos de milho foram obtidos através de debulha manual para determinação da produtividade de grãos, transformando-se a massa de grãos para kg ha<sup>-1</sup> a 13% de umidade (13% base úmida). A massa de grãos constituiu a parte ensilada.

### **3.10 Produtividade de massa seca vegetal na entressafra**

No período de entressafra, antes da entrada dos animais, no mês de junho de 2014 e 2015, foram coletados os materiais vegetais da aveia semeada a lanço e em linha, da palhada e do capim-marandu. Nos meses de novembro de 2014 e 2015, período este posterior ao pastejo dos animais e anterior a dessecação das plantas remanescentes, foram realizadas coletas de palhada e capim-marandu, uma vez que neste período já não havia mais aveia.

As coletas foram realizadas com auxílio de um quadrado metálico de 0,5 x 0,5 m e tesoura de poda. Foram realizados 3 lançamentos ao acaso dentro de cada parcela para constituir uma amostra composta. As amostras foram devidamente acondicionadas em sacos de papel.

O material vegetal da parte aérea das plantas foram secas em estufa de circulação forçada, a 65° C por 72h para determinação do teor de matéria seca vegetal residual total no período de entressafra.

### **3.11 Análise estatística**

Todos os dados foram inicialmente testados quanto à normalidade através do teste de Shapiro-Wilk (1965). Todos os dados foram distribuídos normalmente ( $W \geq 0,90$ ).

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 Sisvar® (FERREIRA, 2011).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Física do solo

#### 4.1.1 Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo

Os resultados da análise de variância para densidade do solo (DS), porosidade total (PT), macroporosidade (MA) e microporosidade (MI) estão apresentados na Tabela 1. Verificou-se que para todas as variáveis apresentadas, houve efeito significativo de pelo menos um fator isolado (sistema de produção ou época de avaliação) em todas as camadas avaliadas.

Tabela 1. Valores  $p$  do teste de F das variáveis densidade do solo (DS), porosidade total (PT), macroporosidade (MA) e microporosidade (MI) avaliadas nas camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2; 0,2 - 0,4 m.

Fonte de variação	DS	PT	MA	MI
<i>Camada 0,0 - 0,05 m</i>				
Trat. (A)	0,011	0,067	0,431	0,425
Época (B)	0,606	<0,001	<0,001	<0,001
A X B	0,698	0,043	0,189	0,698
<i>Camada 0,05 - 0,1 m</i>				
Trat. (A)	0,045	0,451	0,147	0,197
Época (B)	0,483	0,002	<0,001	<0,001
A X B	0,113	0,079	0,006	0,094
<i>Camada 0,1 - 0,2 m</i>				
Trat. (A)	0,896	0,575	0,048	0,035
Época (B)	0,041	<0,001	<0,001	<0,001
A X B	0,746	0,321	0,317	0,021
<i>Camada 0,2 - 0,4 m</i>				
Trat. (A)	0,913	0,628	0,479	0,650
Época (B)	0,054	<0,001	<0,001	<0,001
A X B	0,119	0,026	0,435	0,905

Pode-se observar que para a variável DS não houve efeito significativo da interação entre sistema de produção (tratamento) e épocas de avaliação (meses) em nenhuma das camadas do solo avaliadas. Para as variáveis PT, MA e MI houve efeito significativo entre sistema de produção e época para camadas abaixo de 0,05 m de profundidade (Tabela 1).

No presente experimento, a DS variou de 1,26 a 1,41 kg dm<sup>-3</sup> para os sistemas de produção avaliados ao longo do tempo, em todas as camadas do solo (Tabela 2).

Tabela 2. Efeito dos sistemas de produção e das épocas de avaliação na densidade do solo (DS), porosidade total (PT), macroporosidade (MA) e microporosidade (MI) avaliadas nas camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2; 0,2 - 0,4 m.

Fonte de variação	DS --- kg dm <sup>-3</sup> ---	PT ----- dm <sup>3</sup> dm <sup>-3</sup> -----	MA ----- dm <sup>3</sup> dm <sup>-3</sup> -----	MI
Sistema de produção		<i>Camada 0,0 - 0,05 m</i>		
MB+ALA	1,29 ab	0,49	0,19	0,31
MB+ALI	1,31 a	0,50	0,19	0,30
MBG+ALA	1,22 c	0,52	0,21	0,31
MBG+ALI	1,24 bc	0,50	0,19	0,32
Época (meses)				
6	1,29	0,48 b	0,22 a	0,26 c
12	1,25	0,48 b	0,14 b	0,34 a
18	1,28	0,50 b	0,17 b	0,33 ab
24	1,26	0,55 a	0,24 a	0,31 b
Sistema de produção		<i>Camada 0,05 - 0,1 m</i>		
MB+ALA	1,39 ab	0,47	0,14	0,33
MB+ALI	1,41 a	0,46	0,16	0,30
MBG+ALA	1,34 b	0,48	0,16	0,32
MBG+ALI	1,37 ab	0,47	0,14	0,33
Época (meses)				
6	1,39	0,46 b	0,20	0,26 c
12	1,36	0,46 b	0,11	0,36 a
18	1,39	0,46 b	0,11	0,35 ab
24	1,36	0,50 a	0,18	0,32 b
Sistema de produção		<i>Camada 0,1 - 0,2 m</i>		
MB+ALA	1,39	0,47	0,14 ab	0,33
MB+ALI	1,38	0,48	0,16 a	0,32
MBG+ALA	1,39	0,47	0,12 b	0,34
MBG+ALI	1,39	0,46	0,13 b	0,33
Época (meses)				
6	1,40 ab	0,46 b	0,16 a	0,29
12	1,37 ab	0,46 b	0,10 b	0,35
18	1,42 a	0,45 b	0,11 b	0,34
24	1,35 b	0,52 a	0,18 a	0,33
Sistema de produção		<i>Camada 0,2 - 0,4 m</i>		
MB+ALA	1,31	0,49	0,17	0,33
MB+ALI	1,30	0,49	0,17	0,33
MBG+ALA	1,32	0,49	0,15	0,34
MBG+ALI	1,31	0,48	0,15	0,33
Época (meses)				
6	1,31	0,49	0,21 a	0,28 b
12	1,31	0,47	0,12 b	0,36 a
18	1,35	0,46	0,11 b	0,35 a
24	1,26	0,54	0,20 a	0,35 a

Médias seguidas de uma mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ).

De acordo com Reichert et al. (2003) o valor de DS ideal para o bom desenvolvimento das culturas varia de 1,4 a 1,6 kg dm<sup>-3</sup> em solos argilosos, enquanto que nos trabalhos de Carter (1998) e Drewry et al. (2001) estes valores são considerados ideais entre 1,25 e 1,30 kg dm<sup>-3</sup>. Entretanto, em diversos trabalhos, verificou-se que a máxima produtividade pode ser alcançada com valores de DS entre 0,9 e 1,2 kg dm<sup>-3</sup> (REYNOLDS et al., 2007; TORMENA et al., 2008; DREWRY et al., 2008).

Na camada de 0,0 a 0,05 m e 0,05 a 0,1 m houve menores valores de DS nos sistemas MBG+ALA e MBG+ALI (Tabela 2). Este efeito pode estar relacionado à presença da leguminosa (feijão-guandu), que devido ao seu sistema radicular pivotante associado ao fasciculado das gramíneas em consórcio (milho e capim-marandu) pode ter melhorado a porosidade do solo. Essa interação radicular pode promover mudanças mais efetivas na estrutura do solo, principalmente relacionada a PT, que é influenciada pelos bioporos formados no solo após morte das raízes do feijão-guandu.

No estudo realizado por Reinert et al. (2008), os autores avaliaram a distribuição de raízes de diferentes leguminosas, entre elas o feijão-guandu sob semeadura direta em argissolo vermelho e constataram que em valores de DS abaixo de 1,75 kg dm<sup>-3</sup>, o feijão-guandu apresentou sistema radicular bem distribuído ao longo do perfil, apresentando menor DS na camada de 0,05 a 0,1 m de profundidade. Segundo Genro Junior (2002), ao avaliar a compactação do solo com o uso de rotação de culturas no SSD, constatou que houve maior condutividade hidráulica nos tratamentos que incluíam o feijão-guandu na rotação. Esse mesmo autor, atribuiu este efeito ao aumento de poros contínuos e de maior diâmetro formados pela decomposição das raízes do feijão-guandu.

De modo geral, observou-se redução dos valores da DS ao longo do tempo principalmente na camada de 0,1 a 0,2 m (Tabela 2). Provavelmente, a redução nos valores da DS, ocorreu devido à exploração do solo por sistemas radiculares distintos (gramíneas e leguminosas), uma vez que, após a decomposição da massa radicular, estas contribuem para formação de uma arquitetura de poros permanentes, conferindo ao solo maior MA e, conseqüentemente, menor densidade. Esse comportamento também foi observado por diversos autores, os quais obtiveram melhoria nesses atributos do solo quando utilizaram a rotação de culturas, principalmente com o consórcio do milho com espécies forrageiras tropicais, de

pastagem e da cultura da soja em sucessão (FLORES et al., 2007; CHIODEROLI et al., 2012; MENDONÇA et al., 2013; COSTA et al., 2015a).

Embora na presente pesquisa não tenha ocorrido efeito isolado dos sistemas de produção na PT, MA e MI, observou-se efeito significativo das épocas de avaliação (Tabela 2). A PT variou positivamente ao longo do tempo, com maior valor aos 24 meses nas camadas de 0,0 a 0,05; 0,05 a 0,1; 0,1 a 0,2 m, enquanto que a MA, nas camadas 0,0 a 0,05; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m. Este efeito demonstra que os SIPA podem promover aumento na PT e MA do solo ao longo do tempo, principalmente devido à colonização de raízes no perfil do solo, durante os ciclos de produção das culturas, uma vez que estas formam canais radiculares que favorecem a infiltração de água no perfil do solo.

Efeitos benéficos a porosidade do solo, foram atribuídos à maior colonização de raízes de plantas de cobertura ao longo de três anos em camadas mais superficiais, em pesquisa realizada por Calonego (2007). Após a morte das raízes durante os cultivos, há o surgimento de canais no solo, também conhecidos como bioporos, que favorecem a difusão de oxigênio, as trocas gasosas e a infiltração de água (ABREU et al., 2004). Além disso, na presente pesquisa, essas alterações interferiram positivamente no conteúdo de água no solo, como pode ser constatado observando-se as mudanças no índice S do 6º para o 24º mês de avaliação (Figura 4).

Para os valores de PT, houve efeito significativo da interação (Trat. x Época) apenas para as camadas do solo de 0,0 a 0,05 e 0,2 a 0,4 m (Tabela 3). Na camada de 0,0 a 0,5 m, pode-se observar que no 6º mês, o menor valor de PT ocorreu no sistema MB+ALI. Tal resultado se deve, provavelmente, ao fato de não haver revolvimento superficial do solo nesse sistema de produção, diferentemente do que ocorre nos sistemas MB+ALA e MBG+ALA.

Pode-se notar que os valores de PT para o sistema MBG+ALI foram semelhantes aos encontrados nos sistemas MB+ALA e MBG+ALA na camada de 0,0 a 0,05 m durante o 6º mês (Tabela 3), mesmo que o sistema MBG+ALI não tenha passado por revolvimento superficial para incorporação das sementes de aveia (grade niveladora).

Provavelmente, a presença do feijão-guandu e/ou operações de revolvimento superficial do solo, promoveram aumento da PT, principalmente pela exposição e fracionamento das estruturas do solo, gerando assim, maior espaço entre agregados. As operações mecanizadas leves, como a gradagem niveladora,

resultaram na diminuição da DS (Tabela 2) e PT (Tabela 3) nas camadas mais superficiais. Estes resultados mostram que o uso de feijão-guandu pode ser uma boa opção para compor SIPA na região em estudo, promovendo alterações biofísicas relevantes no solo. Segundo Tormena et al. (2002; 2004), avaliando a PT do solo sob SSD, constataram aumento da porosidade do solo com a escarificação do mesmo, devido a presença da intervenção mecânica, assim como o observado por Hill; Cruse (1985) e Tollner et al. (1984).

Tabela 3. Efeito das interações significativas dos sistemas de produção em função das épocas para a porosidade total do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) nas camadas de 0,0 - 0,05 e 0,2 - 0,4 m.

Sistema de produção	Época (meses)			
	6	12	18	24
<i>Camada 0,0 – 0,05 m</i>				
MB+ALA	0,50 aA	0,49 aA	0,50 aA	0,51 aA
MB+ALI	0,43 bC	0,47 aBC	0,50 aAB	0,54 aA
MBG+ALA	0,52 aAB	0,48 aB	0,53 aAB	0,57 aA
MBG+ALI	0,47 abB	0,49 aB	0,49 aB	0,56 aA
<i>Camada 0,2 – 0,4 m</i>				
MB+ALA	0,54 aA	0,46 aB	0,43 bB	0,56 aA
MB+ALI	0,50 aAB	0,49 aAB	0,47 abB	0,54 aA
MBG+ALA	0,49 abA	0,48 aA	0,49 aA	0,52 aA
MBG+ALI	0,44 bB	0,46 aB	0,49 aAB	0,54 aA

Médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas na coluna comparam os tratamentos e letras maiúsculas nas linhas comparam as épocas.

Além disso, a quantidade de material vegetal aportado ao sistema, principalmente nos períodos de entressafra, pode ter contribuído para a redução da PT do solo sob sistema MB+ALI para a camada de 0,0 a 0,05 m no 6º mês de avaliação (Tabela 3). Durante o 6º e 12º mês, constatou-se os menores valores de massa seca vegetal para o sistema MB+ALI (Tabela 22). Braidá et al. (2006) avaliando resíduos vegetais na superfície e suas relações com a densidade máxima, após realizado o ensaio de proctor, constataram que a presença da palha promoveu dissipação das forças atuantes sobre o solo, oriundas do tráfego de máquinas e animais, resultando em redução significativa na densidade máxima após os testes.

A compactação do solo tornou-se um problema mundial como resultado de cultivo intensivo, aumento do uso de maquinaria pesada, ausência de rotações e práticas inadequadas de manejo do solo (ROSOLEM et al., 2002; SERVADIO et al.,

2001, 2005; HAMZA; ANDERSON, 2005; CHEN et al., 2014; CALONEGO et al., 2017).

A introdução de culturas de cobertura em sistemas agrícolas em SSD é importante na estruturação e recuperação do solo (CALONEGO et al., 2017). Estes mesmos autores realizaram pesquisa em condições edafoclimáticas semelhantes às do presente estudo, com o objetivo de avaliar as propriedades físicas do solo influenciadas pelo cultivo de culturas de cobertura (triticale (*Triticosecale Wittmack*), girassol [*Helianthus annuus* (L.)] milho [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Brown], sorgo forrageiro [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] e crotalária [*Crotalaria juncea* (L.)], além da escarificação em um solo compactado sobre a produtividade da cultura da soja.

De acordo com Calonego et al. (2017), a longo prazo, as culturas de cobertura melhoram a estrutura do solo, com aumento da macroporosidade e uma diminuição da densidade do solo até 0,60 m de profundidade. Em pesquisa realizada por Garcia et al. (2013), avaliando áreas com cultivo das culturas do milho e do sorgo, em comparação com áreas de pousio, verificaram maior porosidade (total, macro e micro), menor densidade aparente e maior número de agregados maiores que 2 mm na camada 0-0,10 m nas áreas com culturas.

Os efeitos benéficos dos SIPA devem-se ainda ao fato de que a palhada, acumulada pelas plantas de cobertura ou das pastagens e dos restos culturais de lavouras comerciais, proporciona um ambiente favorável à recuperação ou manutenção dos atributos físicos e químicos do solo (FLORES et al., 2007; SANTOS et al., 2008; CHIODEROLI et al., 2012; MENDONÇA et al., 2013; COSTA et al., 2015a). Assim, a utilização de sistemas de manejo de solo e plantas com bases conservacionistas, como é o caso do SSD, da rotação de culturas e, mais recentemente, de SIPA nos sistemas de produção atuais, tornam-se fatores decisivos na melhoria da qualidade ambiental, podendo proporcionar maiores produtividades das culturas.

Na camada de 0,2 a 0,4 m, houve efeito significativo da interação entre sistema de produção e época para PT do solo (Tabela 3). O menor valor de PT ocorreu para o sistema MBG+ALI durante o 6º mês e para MB+ALA no 18º mês (Tabela 3). De maneira geral, houve aumento da PT, com os maiores valores no 24º mês. Tal fato demonstra que os sistemas de produção avaliados podem promover alterações na PT mesmo em camadas mais profundas do solo ao longo do tempo, fator este que

pode ser benéfico ao sistema de cultivo, uma vez que pode proporcionar melhores condições ao desenvolvimento das culturas.

Houve interação significativa entre sistemas de produção e época para a MA nas camadas de 0,0 a 0,05 e de 0,05 a 0,1 m de profundidade (Tabela 4). Os menores valores de MA ocorreram sob os sistemas MB+ALI e MBG+ALI durante o 6º mês na camada de 0,0 a 0,05 m. Este resultado pode estar relacionado ao uso do método de semeadura da aveia a lanço, com incorporação das sementes com uso de grade niveladora. Como já abordado anteriormente, o processo de revolvimento do solo e incorporação das sementes de aveia, influenciaram positivamente a PT que está diretamente relacionada com o aumento da MA em MBG+ALA e MB+ALA.

A menor MA do solo na camada de 0,0 a 0,05 m (Tabela 4) para os sistemas MB+ALI e MBG+ALI no 6º mês, pode ter correlação com o efeito físico das hastes dos implementos utilizados durante a semeadura das culturas. A ação dos implementos como semeadora-adubadora para SSD dotada de mecanismo para abertura de sulco do tipo haste sulcadora e mecanismos de corte do tipo “facão” ou “botinha”, podem favorecer o surgimento de camadas compactadas (“pé de grade”), ou então, de camadas com selamento superficial de poros, que podem interferir na diminuição da capilaridade e conseqüente translocação e armazenamento de água no solo.

Tabela 4. Efeito das interações significativas dos sistemas de produção em função das épocas de avaliação na macroporosidade do solo ( $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ ) para as camadas do solo de 0,0 - 0,05 e 0,05 - 0,1 m.

Sistema de produção	Época (meses)			
	6	12	18	24
<i>Camada 0,0 – 0,05 m</i>				
MB+ALA	0,24 abA	0,17 aAB	0,16 aB	0,20 aAB
MB+ALI	0,19 bAB	0,15 aB	0,17 aAB	0,24 aA
MBG+ALA	0,27 aA	0,11 aB	0,22 aA	0,25 aA
MBG+ALI	0,19 bAB	0,13 aB	0,16 aB	0,26 aA
<i>Camada 0,05 – 0,1 m</i>				
MB+ALA	0,16 bA	0,12 aA	0,13 abA	0,14 bA
MB+ALI	0,23 aA	0,13 aBC	0,10 bcC	0,17 abB
MBG+ALA	0,20 abAB	0,08 aC	0,16 aB	0,22 aA
MBG+ALI	0,20 abA	0,10 aB	0,07 cB	0,19 aA

Médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas na coluna comparam os tratamentos e letras maiúsculas nas linhas comparam as épocas.

É possível que nos sistemas com adoção de semeadura da aveia em linha (MB+ALI e MBG+ALI) tenha ocorrido diminuição da MA do solo (Tabela 4), devido ao maior número de operações realizadas com semeadora-adubadora (uma a mais que nos sistemas com aveia a lanço). Este fato pode ter resultado em maior compressão na superfície do solo, principalmente nas camadas superficiais. Além disso deve-se considerar que nesses sistemas não ocorreram operações de revolvimento com a gradagem niveladora, que pode ter contribuído para as diferenças na MA entre os sistemas avaliados.

De modo geral, a MA verificada no presente estudo foi superior ao limite de  $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$  estabelecido por Grable; Siemer (1968) como crítico para o crescimento ótimo da planta. Uma macroporosidade maior favorece o crescimento radicular, a infiltração de água e a difusão de oxigênio no perfil do solo, o que favorece o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, maior produção da cultura (CALONEGO et al., 2017).

Em pesquisa realizada por Costa et al. (2015a), os autores enfatizam a importância do correto manejo do solo e das culturas visando a manutenção da qualidade do solo em SIPA. De acordo com esses mesmos autores, em sistemas de produção intensivos, como os da presente pesquisa, ao contrário do que ocorre com a colheita de grãos, a colheita da silagem com colhedoras de forragem de uma linha de 0,90 m, acopladas ao trator, eleva consideravelmente o trânsito na área, pois o rodado do trator passa sobre quase todas as linhas de semeadura. Além disso, o peso da carreta carregada de material para ensilagem também não pode ser desconsiderado.

O intenso pisoteio animal no solo pode ocasionar pressão superior ao das máquinas agrícolas, principalmente em camadas superficiais, geralmente nos primeiros 0,05 a 0,08 m (FLORES et al., 2007; LOPES et al., 2009). Em contrapartida, as máquinas agrícolas, apesar de seu maior peso, exercem pressão menor sobre a superfície do solo, uma vez que têm melhor distribuição desse peso por área (pneus) (HAMZA; ANDERSON, 2005).

Portanto, na presente pesquisa, o uso de semeadura de aveia a lanço com incorporação das sementes através de operações de gradagem, podem favorecer à diminuição do adensamento em sistemas SIPA sob SSD. No entanto, a gradagem pode promover aceleração do processo de decomposição do material vegetal no sistema, fazendo com que os teores de MOS decaiam ao longo do tempo, sendo,

portanto, uma prática que deve ser evitada no sentido de se obter melhor preservação das estruturas naturais do solo. Segundo Araujo et al. (2004) e Busscher et al. (2002), avaliando efeitos do preparo de solo com escarificador, observaram que apesar dos efeitos positivos dessa prática ao solo, existem evidências de que esses efeitos são de curta duração.

Para Mello (2001) em áreas pastejadas sob SIPA, a densidade do solo aumentou na camada superficial, porém, não ultrapassa dez centímetros de profundidade e é facilmente rompida com o uso de sulcadores de haste por ocasião da semeadura das culturas produtoras de grãos.

A pressão exercida sobre o solo é o principal agente causador da compactação. Entretanto, a camada de palha na superfície do solo é grande atenuador desse efeito, fato esse que deve ser considerado em sistemas conservacionistas como os avaliados na presente pesquisa. Esse mesmo efeito foi verificado por Costa et al. (2015a), em que os autores observaram que ao longo do tempo houve redução da DS com incremento da MA e PT, tanto nas camadas superficiais (0 - 0,1 m) como nas subsuperficiais (0,1 - 0,2 m). Foi possível constatar que na camada de 0,0 a 0,05 m, houve manutenção da MA no 24º mês para os quatro sistemas avaliados (Tabela 4). Este resultado demonstra que os SIPA avaliados na presente pesquisa, com uso da consorciação de milhoxcapim-maranduxfeijão-guandu, podem ser importantes ferramentas para recuperação da MA do solo, principalmente em camadas mais superficiais, a curto prazo.

Na camada de 0,0 a 0,05 m os menores valores de MA do solo ocorreram durante o 12º mês para todos os sistemas de produção (Tabela 4). Este efeito pode ser decorrente do pastejo dos animais entre o 6º e 12º mês, aplicando-se forças na superfície do solo que deformam as estruturas, promovendo alterações físicas principalmente nos poros de maior diâmetro.

A partir do 18º mês, houve aumento da MA (Tabela 4). Embora as avaliações realizadas no 12º e 24º mês, períodos estes posteriores aos ciclos de pastejo, não houve redução da MA no 24º mês assim como observado para o 12º mês. Esse resultado pode ser um indicativo de que o tempo de adoção dos SIPA, é fator importante para atenuar os efeitos das ações antrópicas, principalmente quanto ao tráfego de máquinas, implementos e pisoteio animal.

É importante ressaltar que os valores de DS e MA estão dentro da faixa considerada como ideal para diversos autores como já abordado. Além disso, em

pesquisa realizada por Flores et al. (2007) foi observado que o pastejo em Latossolo Vermelho aumentou a densidade e reduziu a porosidade, mas não influenciou o rendimento da soja após o pastejo. Lunardi et al. (2008), avaliando a intensidade de pastejo sobre azevém (*Lolium multiflorum*), cultivado em um Argissolo Vermelho distrófico típico, verificaram que a soja cultivada após pastagem de inverno apresentou rendimento de grãos superior à soja cultivada após cobertura do solo, sem pastejo.

O uso de espécies forrageiras em consórcio com o milho e espécies leguminosas são ferramentas importantes para ascensão dos sistemas integrados de produção sob semeadura direta, uma vez que os efeitos positivos para a qualidade da estrutura do solo levam tempo para serem perceptíveis.

A médio e longo prazo, tem sido verificado benefícios significativos na estrutura do solo com a adoção do SSD e o uso de culturas de cobertura com sistemas radiculares agressivos (CALONEGO; ROSOLEM, 2008; CALONEGO et al., 2017). Algumas gramíneas forrageiras, como braquiária, milho, sorgo e milheto possuem sistema radicular fasciculado com alta habilidade para explorar o perfil do solo. Neste contexto, espécies com sistema radicular pivotante, como o feijão-guandu, crotalária e nabo forrageiro, possuem menor quantidade de raízes, porém têm maior capacidade de romper as camadas de solo compactadas, uma vez que podem se desenvolver em profundidades maiores (ROSOLEM et al., 2002).

Não houve diferença entre os sistemas de produção para os valores médios de MI na camada de 0,0 a 0,05 m (Tabela 5). Para a camada de 0,1 a 0,2 m houve diferença nos valores médios de MI do solo apenas no 6º mês, onde o tratamento MB+ALI apresentou o menor valor (Tabela 5). Esta redução pode ser consequência da ausência do feijão-guandu, já que a presença de um ou mais tipos de sistemas radiculares podem promover alterações distintas nas propriedades físicas do solo.

Houve menores valores de MI para as camadas de 0,0 a 0,05 e 0,1 a 0,2 m no 6º mês (Tabela 5), com exceção ao tratamento MB+ALA que não influenciou significativamente no valor médio de MI ao longo do tempo para a camada de 0,1 a 0,2 m. Os menores valores de MI no início das avaliações (6º mês), é provavelmente reflexo do curto período de tempo que os sistemas tiveram para expressar suas influências nos atributos físicos do solo. Entretanto, a partir do 12º mês houve, de modo geral, aumento da MI.

Tabela 5. Efeito dos sistemas de produção em função das épocas na microporosidade do solo ( $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ ) para as camadas do solo de 0,0 - 0,05 e 0,1 - 0,2 m.

Sistema de produção	Época (meses)			
	6	12	18	24
<i>Camada 0,0 – 0,05 m</i>				
MB+ALA	0,26 aB	0,33 aA	0,34 aA	0,32 aA
MB+ALI	0,24 aB	0,32 aA	0,33 aA	0,30 aA
MBG+ALA	0,25 aC	0,37 aA	0,31 aB	0,32 aB
MBG+ALI	0,28 aB	0,35 aA	0,34 aA	0,30 aAB
<i>Camada 0,1 – 0,2 m</i>				
MB+ALA	0,32 aA	0,35 aA	0,34 aA	0,34 aA
MB+ALI	0,24 bB	0,35 aA	0,34 aA	0,34 aA
MBG+ALA	0,33 aB	0,37 aA	0,35 aAB	0,34 aAB
MBG+ALI	0,29 aB	0,36 aA	0,35 aA	0,33 aAB

Médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas na coluna comparam os tratamentos e letras maiúsculas nas linhas comparam as épocas.

A inclusão de pastagens na rotação de culturas provoca melhoria da qualidade física do solo devido à combinação de 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 (MARCHÃO, 2007). Em pesquisa realizada por Costa et al. (2015a), avaliando-se diferentes sistemas de produção em consórcio, utilizando-se as culturas do milho, sorgo, capim-marandu e capim-tanzânia para produção de silagem e pastagem na entressafra, sendo que estas foram semeadas por ocasião do consórcio ou sucessão às culturas graníferas, além da cultura da soja em rotação após dois anos de gramíneas. De acordo com estes mesmos autores, de modo geral, as modalidades de semeadura das forrageiras (consórcio no verão ou sucessão no outono) não influenciaram os atributos físicos do solo, com exceção à MI na camada de 0 a 0,2 m, em que as espécies implantadas por ocasião do consórcio proporcionaram os maiores valores.

No consórcio de forrageiras tropicais com o milho para produção de silagem, no SSD, a compactação do solo é menor em razão deste não ter sua estrutura alterada pela aração e gradagem, possuir maior cobertura do solo no momento da ensilagem do milho e, ainda, contar com a ação do sistema radicular do capim, que explora maior volume de solo (MENDONÇA et al., 2013; COSTA et al., 2015a). Além dessas vantagens, o consórcio oferece pastagem no período seco do ano (AGNES et al., 2004; COSTA et al., 2016; 2017; PARIZ et al., 2017a; b; c).

Assim, fica evidente mais uma vez, os efeitos benéficos dos SIPA na melhoria da qualidade física do solo. Diversos trabalhos de pesquisa demonstraram o aspecto positivo nos atributos físicos do solo quando se adota o SIPA sob SSD (FLORES et al., 2007; MENDONÇA et al., 2013; COSTA et al., 2015a; PARIZ et al., 2017a), podendo-se citar a redução da compactação do solo, refletindo no incremento da macroporosidade e porosidade total e diminuição da resistência mecânica à penetração e densidade do solo, principalmente nas camadas superficiais.

#### **4.1.2 Diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico, percentagem de agregados maiores que 2,0 mm, índice de estabilidade de agregados e resistência do solo a penetração**

Os resultados da análise de variância para diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), quantidade de agregados maiores que 2,0 mm (AGR>2), índice de estabilidade de agregados (IEA) e resistência do solo à penetração (RP) estão apresentados na Tabela 6. Pode-se verificar que houve influência significativa dos sistemas de produção e épocas de avaliação para a maioria dos atributos avaliados. Além disso, houve influência da interação significativa entre estes fatores para RP e IEA nas camadas de 0,0 a 0,5 e 0,5 a 0,1 m de profundidade.

Foi possível constatar, que houve influência dos sistemas de produção para o DMP, DMG, AGR>2 mm, IEA e RP considerando-se a média das quatro épocas de avaliação (Tabela 7). A prática da semeadura de aveia a lanço associada a gradagem niveladora para incorporação das sementes da aveia, diminuíram o DMG nas camadas de 0,0 a 0,2 m para o sistema MB+ALA. Cabe ressaltar ainda que a influência da gradagem niveladora, já foi observado para outros atributos físicos do solo, tais como a PT (Tabela 3) e MA (Tabela 4).

No entanto, para o sistema MBG+ALA não houve redução significativa nos valores de DMG. Isso reforça a hipótese de que a presença de feijão-gandu em consórcio, pode contribuir para atenuar os efeitos deletérios causados aos atributos físicos do solo, principalmente aqueles relacionados com o DMG, a PT e MA.

Tabela 6. Valores  $p$  do teste de F para as variáveis diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), agregados maiores que 2,0 mm (AGR>2), índice de estabilidade de agregados (IEA) e resistência do solo à penetração (RP) avaliadas nas camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2 e 0,2 - 0,4 m.

Fonte de variação	DMP	DMG	AGR>2	IEA	RP
<i>Camada 0,0 - 0,05 m</i>					
Trat. (A)	0,053	0,031	0,091	0,011	<0,001
Época (B)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
A X B	0,034	0,062	0,046	0,296	<0,001
<i>Camada 0,05 - 0,1 m</i>					
Trat. (A)	0,004	0,001	0,006	<0,001	<0,001
Época (B)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
A X B	0,494	0,754	0,660	<0,001	<0,001
<i>Camada 0,1 - 0,2 m</i>					
Trat. (A)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,208
Época (B)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
A X B	0,138	0,370	0,271	0,239	0,340
<i>Camada 0,2 - 0,4 m</i>					
Trat. (A)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,079
Época (B)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,003
A X B	0,001	0,002	0,001	0,013	0,580

As culturas com sistemas radiculares fasciculados e agressivos ajudam na formação dos agregados do solo, facilitando assim, o crescimento radicular das culturas no sistema de rotação e a maior infiltração de água. A agregação do solo é incrementada pelos sistemas de manejo do solo, principalmente quando se inclui culturas com alta capacidade para formar raízes e aumentar a matéria orgânica do solo (MOS) (CASTRO et al., 2011). A contribuição da MOS na formação de agregados é atribuída à processos como a formação de pontes catiônicas, à cimentação entre partículas e à maior estabilidade produzidas por exsudatos radiculares e microbianos ao redor e dentro do agregado (TISDALL; OADES, 1982; CASTRO et al., 2015; CALONEGO et al., 2017).

Na Tabela 7 estão apresentadas as médias de DMP, DMG, AGR>2, IEA e RP para os efeitos isolados de sistemas de produção e das épocas de avaliações.

Observando-se o DMP e AGR>2 (Tabela 7), foi possível constatar que houve redução dos valores obtidos para estas variáveis nos sistemas com uso de gradagem para incorporação das sementes de aveia (MB+ALA e MBG+ALA), principalmente nas camadas superficiais (0,05 a 0,2 m). Este resultado demonstra que o uso da gradagem niveladora aumentou a ocorrência de classe de agregados

de menor diâmetro tanto nos sistemas que adotaram o consórcio duplo (milhoxcapim-marandu) quanto no consórcio triplo (milhoxcapim-maranduxfeijão-guandu).

Tabela 7. Efeito dos sistemas de produção e das épocas no diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), agregados maiores que 2,0 mm (AGR>2), índice de estabilidade de agregados (IEA) e resistência do solo à penetração (RP) avaliados nas camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2; 0,2 - 0,4 m.

Fonte de variação	DMP ----- mm -----	DMG ----- mm -----	AGR>2 ----- % -----	IEA	RP --- MPa ---
Sistema de produção	<i>Camada 0,0 – 0,05 m</i>				
MB+ALA	3,82	2,78 b	73,17	92,99 b	1,88
MB+ALI	4,03	3,15 a	77,44	94,64 a	2,60
MBG+ALA	3,75	2,94 ab	73,10	94,57 a	1,64
MBG+ALI	4,03	3,28 a	79,21	95,73 a	1,67
Época (meses)					
6	4,12	3,36 a	79,22	96,25 a	2,33
12	4,02	3,55 a	82,30	96,76 a	1,90
18	3,89	2,90 b	74,69	94,07 b	1,14
24	3,60	2,35 c	66,71	90,87 c	2,43
Sistema de produção	<i>Camada 0,05 – 0,1 m</i>				
MB+ALA	3,45 c	2,38 b	63,87 b	92,55	2,17
MB+ALI	3,82 a	2,85 a	71,92 a	94,91	3,07
MBG+ALA	3,60 bc	2,70 a	68,65 ab	93,89	2,15
MBG+ALI	3,76 ab	2,97 a	73,01 a	95,30	2,26
Época (meses)					
6	3,87 a	2,99 b	73,03 b	95,94	2,84
12	3,96 a	3,42 a	80,30 a	96,75	2,63
18	3,60 b	2,54 c	67,57 c	94,08	2,21
24	3,20 c	1,93 d	56,53 d	89,88	1,97
Sistema de produção	<i>Camada 0,1 - 0,2 m</i>				
MB+ALA	2,84 c	1,76 b	49,43 c	89,36 b	2,94
MB+ALI	3,45 ab	2,46 a	63,20 ab	93,69 a	3,08
MBG+ALA	3,19 b	2,22 a	58,26 b	92,91 a	2,66
MBG+ALI	3,49 a	2,57 a	65,48 a	94,32 a	2,55
Época (meses)					
6	3,62 a	2,63 a	66,57 a	94,41 a	3,55 a
12	3,47 a	2,77 a	67,76 a	95,33 a	2,67 bc
18	3,08 b	1,98 b	54,58 b	91,50 b	2,21 c
24	2,81 c	1,64 b	47,47 c	89,05 c	2,80 b
Sistema de produção	<i>Camada 0,2 - 0,4 m</i>				
MB+ALA	2,43	1,47	41,69	85,85	2,75
MB+ALI	3,01	2,05	55,02	91,13	2,82
MBG+ALA	2,44	1,43	42,62	86,07	2,36
MBG+ALI	2,96	2,00	53,89	90,77	2,18
Época (meses)					
6	2,97	1,95	52,52	92,12	2,92 a
12	3,18	2,51	62,50	94,00	2,41 ab
18	2,45	1,35	41,72	84,81	1,94 b
24	2,25	1,15	36,48	82,90	2,84 a

Médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ).

Os sistemas de produção também promoveram alterações no IEA, com comportamento semelhante ao encontrado para o DMP e DMG, ou seja, os menores valores de IEA ocorreram no sistema MB+ALA para as camadas de 0,0 a 0,05 e 0,1 a 0,2 m (Tabela 7). Em pesquisa realizada por SILVA; MIELNICZUK (1997) verificaram redução do diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados de 47% num Latossolo Roxo, quando passaram de uma condição de campo nativo para o preparo convencional com culturas anuais, submetidas a aração e gradagem. Por outro lado, os mesmos autores verificaram aumento da estabilidade dos agregados quando o solo foi submetido ao sistema de plantio direto.

Nas Tabela 8 e Tabela 9 estão apresentadas as médias de DMP e DMG, para o desdobramento da interação entre sistemas de produção e épocas de avaliação. Houve influência dos sistemas avaliados nas camadas de 0,0 a 0,05 e de 0,2 a 0,4 m para DMP e na camada de 0,2 a 0,4 m para o DMG. Na camada de 0,0 a 0,05 m houve diferença significativa para estes atributos entre os sistemas de produção, principalmente aos 6 e 12 meses após o início do período experimental (Tabela 8). O menor DMP foi constatado no sistema MB+ALA aos 6 meses e no sistema MBG+ALA aos 12 meses.

Tabela 8. Efeito dos sistemas de produção em função das épocas no diâmetro médio ponderado (mm) para as camadas do solo de 0,0 - 0,05 e 0,2 - 0,4 m.

Sistema de produção	Época (meses)			
	6	12	18	24
<i>Camada 0,0 – 0,05 m</i>				
MB+ALA	3,70 bAB	4,12 aA	4,02 aA	3,45 aB
MB+ALI	4,21 aAB	4,47 aA	3,77 aB	3,71 aB
MBG+ALA	4,22 aA	3,49 bB	3,82 aAB	3,50 aB
MBG+ALI	4,37 aA	4,02 aAB	3,97 aAB	3,78 aB
<i>Camada 0,2 – 0,4 m</i>				
MB+ALA	2,84 aA	3,06 bA	2,08 bB	1,77 bB
MB+ALI	2,89 aB	3,79 aA	2,78 aB	2,60 aB
MBG+ALA	2,96 aA	2,45 cB	2,00 bB	2,39 aB
MBG+ALI	3,22 aAB	3,45 abA	2,96 aB	2,25 aC

Médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas na coluna comparam os tratamentos e letras maiúsculas nas linhas comparam as épocas.

Na camada de 0,2 a 0,4 m houve redução do DMP nos sistemas MB+ALA e MBG+ALA (Tabela 8). Este mesmo comportamento ocorreu para os valores de DMG (Tabela 9), AGR>2 (Tabela 10) e IEA (Tabela 11). Estes resultados podem estar

relacionados às operações de revolvimento do solo, em função da semeadura da aveia a lanço, que devido ao fracionamento físico de estruturas do solo, refletem em reduções no DMP, DMG, AGR>2 e por consequência, o IEA em camadas mais profundas.

Tabela 9. Efeito dos sistemas de produção em função das épocas no diâmetro médio geométrico (mm) para a camada do solo de 0,2 - 0,4 m.

Sistema de produção	Época (meses)			
	6	12	18	24
<i>Camada 0,2 – 0,4 m</i>				
MB+ALA	1,76 aA	2,30 bA	1,04 bB	0,79 bB
MB+ALI	1,86 aB	3,34 aA	1,63 aB	1,41 aB
MBG+ALA	1,97 aA	1,60 cAB	0,95 bC	1,22 abCB
MBG+ALI	2,24 aB	2,81 abA	1,80 aB	1,19 abC

Médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas na coluna comparam os tratamentos e letras maiúsculas nas linhas comparam as épocas.

Os menores valores para DMP (Tabela 8), DMG (Tabela 9), AGR>2 (Tabela 10) e IEA (Tabela 11) para os sistemas MB+ALA e MBG+ALA, ocorreram a partir do 12º mês para a camada de 0,2 a 0,4 m. Esses resultados demonstram, portanto, que a recuperação das estruturas do solo não ocorreu com o passar de dois anos de avaliação em camadas mais profundas, diferentemente do que ocorre na camada de 0,0 a 0,05 m para o DMP e AGR>2 aos 18 e 24 meses após o início da condução do experimento. A melhor agregação do solo em camadas superficiais se deve, provavelmente, pela maior quantidade de resíduos orgânicos, atividade biológica, fertilizantes e ação antrópica que esta camada é submetida em relação a maiores profundidades.

O processo de revolvimento do solo, pode se mostrar benéfico para alguns atributos físicos do solo como a DS e MA, conforme observado na presente pesquisa, no entanto, para outros atributos físicos como a DMP, DMG e AGR>2, pode haver um efeito deletério. Além disso, o sistema poderá ficar dependente de operações consecutivas de revolvimento, a fim de que haja constante redução da DS e MA em níveis como os observados na presente pesquisa. Segundo Calonego (2007) as operações de revolvimento no solo como a escarificação, pode promover uma tendência de acomodação das partículas do solo no espaço poroso, revelando que com o passar do tempo, uma nova operação de escarificação será necessária,

pois o efeito residual da escarificação é pouco duradouro, segundo Ralisch et al. (2001) e Tavares Filho et al. (2006).

Tabela 10. Efeito dos sistemas de produção em função das épocas na percentagem de agregados maiores que 2 mm para as camadas do solo de 0,0 - 0,05 e 0,2 - 0,4 m.

Sistema de produção	Época (meses)			
	6	12	18	24
<i>Camada 0,0 – 0,05 m</i>				
MB+ALA	68,29 bBC	84,32 aA	77,10 aAB	62,98 aC
MB+ALI	80,48 aAB	90,03 aA	70,75 aBC	68,52 aC
MBG+ALA	82,73 aA	70,86 bB	74,11 aAB	64,73 aB
MBG+ALI	85,42 aA	84,00 aA	76,80 aAB	70,63 aB
<i>Camada 0,2 – 0,4 m</i>				
MB+ALA	46,97 aB	58,96 bA	34,50 bC	26,34 bC
MB+ALI	51,71 aB	79,30 aA	46,73 aB	42,35 aB
MBG+ALA	54,02 aA	43,27 cAB	33,53 bB	39,69 aB
MBG+ALI	57,40 aAB	68,49 abA	52,13 aB	37,56 abC

Médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si, pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas na coluna comparam os tratamentos e letras maiúsculas nas linhas comparam as épocas.

Outro fator que pode ter contribuído para redução do DMP e  $AGR > 2$  ao longo do tempo, na camada de 0,0 a 0,05 m e do IEA na camada de 0,05 a 0,1 m (Tabela 11) pode estar associado ao teor de matéria orgânica do solo. Foi possível constatar diminuição nos teores de carbono do solo ao longo dos anos de avaliação. Sabe-se que o carbono do solo se correlaciona diretamente com a matéria orgânica, e que na presente pesquisa, mostrou-se diminuiu ao longo do tempo de avaliação (Tabela 15).

O aumento da estabilidade dos agregados está intimamente relacionado com a capacidade da matéria orgânica de se aderir às partículas minerais do solo, formando as ligações argilo-metal-húmicas (EDWARDS; BREMNER, 1967). Segundo Oliveira et al. (2004), há correlação altamente significativa entre o aumento no teor de MO e o aumento da estabilidade de agregados até 0,1 m de profundidade, corroborando com os dados obtidos na presente pesquisa, nas camadas que vão de 0,0 a 0,1 m para o DMP,  $AGR > 2$  e IEA.

Tabela 11. Efeito dos sistemas de produção em função das épocas no índice de estabilidade de agregados (%) para as camadas do solo de 0,05 - 0,1 e 0,2 - 0,4 m.

Sistema de produção	Época (meses)			
	6	12	18	24
<i>Camada 0,05 – 0,1 m</i>				
MB+ALA	95,24 bA	96,03 aA	93,02 cB	85,92 cC
MB+ALI	95,67 bB	96,99 aA	94,49 abB	92,80 aC
MBG+ALA	96,40 abA	97,04 aA	93,63 bcB	88,52 bC
MBG+ALI	96,79 aA	96,95 aA	95,20 aB	92,30 aC
<i>Camada 0,2 – 0,4 m</i>				
MB+ALA	91,23 aA	93,62 abA	81,79 bB	76,78 bC
MB+ALI	91,65 aAB	96,38 aA	89,95 aBC	86,59 aC
MBG+ALA	91,39 aA	90,13 bA	78,66 bC	84,13 aB
MBG+ALI	94,24 aA	95,88 aA	88,85 aB	84,12 aB

Médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas na coluna comparam os tratamentos e letras maiúsculas nas linhas comparam as épocas.

Houve efeito significativo da interação entre sistemas de produção e épocas de avaliação para a resistência do solo à penetração (RP) nas camadas de 0,0 a 0,05 e 0,05 a 0,1 m (Tabela 12). Houve influência do revolvimento do solo na RP por conta da semeadura a lanço da aveia, assim como o observado para porosidade e agregação do solo.

Tabela 12. Efeito dos sistemas de produção em função das épocas na resistência do solo a penetração (MPa) para as camadas do solo de 0,0 - 0,05 e 0,05 - 0,1 m.

Sistema de produção	Época (meses)			
	6	12	18	24
<i>Camada 0,0 – 0,05 m</i>				
MB+ALA	1,96 bAB	1,84 abBC	1,22 aC	2,52 aA
MB+ALI	4,16 aA	2,50 aB	1,19 aC	2,58 aB
MBG+ALA	1,70 bAB	1,53 bB	1,08 aB	2,27 aA
MBG+ALI	1,54 bB	1,74 bAB	1,08 aB	2,35 aA
<i>Camada 0,05 – 0,1 m</i>				
MB+ALA	1,92 cB	2,99 aA	2,11 abB	1,66 bB
MB+ALI	4,37 aA	2,66 abB	2,51 aB	2,75 aB
MBG+ALA	2,81 bA	2,36 bAB	1,88 bBC	1,57 bC
MBG+ALI	2,29 bcAB	2,51 abA	2,36 abAB	1,90 bB

Médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas na coluna comparam os tratamentos e letras maiúsculas nas linhas comparam as épocas.

Os valores médios de RP encontrados no sistema MBG+ALI, na camada de 0,0 a 0,05 m, durante o 6<sup>o</sup> e 12<sup>o</sup> mês, não diferiram dos tratamentos MB+ALA e

MBG+ALA (Tabela 12). Este resultado demonstra que a presença da leguminosa em consórcio pode ter promovido alterações biofísicas no solo, melhorando não só a RP mas também a PT (Tabela 3) durante o 6º mês. Provavelmente a presença do feijão-guandu também contribuiu para a redução da RP, mesmo no sistema que não foi submetido a ação de grade niveladora (MBG+ALI).

De forma geral, na camada de 0,0 a 0,05 m, houve aumento da RP, com os valores mais altos aos 24 meses, exceto no sistema MB+ALI (Tabela 12). Este resultado provavelmente é decorrente das operações de manejo cultural, que associado ao tráfego frequente de máquinas e ciclos de pastejo, podem ter favorecido o aumento da RP ao longo do tempo. Em pesquisa realizada por Costa et al. (2015a), avaliando-se a influência de diferentes sistemas consorciados sobre os atributos físicos do solo, durante três anos agrícolas em região de Cerrado e verificaram que os resultados de RP (0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,4 m), foram inferiores aos verificados antes da instalação do experimento. Estes mesmos autores atribuíram tal efeito pela utilização das diferentes espécies em rotação de culturas, inclusive com efeito descompactador ao longo do tempo, demonstrando a viabilidade dos sistemas produtivos consorciados. Cabe ressaltar que na pesquisa realizada por Costa et al. (2015a), trata-se apenas de consórcio de culturas, diferentemente do que ocorreu na presente pesquisa. No presente estudo pode ter ocorrido o efeito de compactação do solo exercida pelos pisoteio dos animais durante o período de entressafra associado ao elevado tráfego de máquinas para semeadura das culturas e colheitas das plantas para ensilagem.

De maneira geral, nas camadas superficiais amostradas, os valores de RP foram menores que os verificados nas camadas mais profundas, demonstrando que a presença de tráfego de máquinas e animais nos SIPA sob SSD, não prejudicou a RP, provavelmente em razão da maior mobilização do solo e presença de raízes principalmente nas camadas que vão de 0,0 a 0,1 m de profundidade (Tabela 16). Ao longo dos anos de cultivos no SSD, a DS pode diminuir com o tempo de adoção do sistema, o que, aliado aos SIPA bem manejados, tem demonstrado melhoria física do solo em razão do aumento no teor de MOS, melhorando a estrutura do solo (FLORES et al. 2007; SPERA et al. 2010b; CHIODEROLI et al. 2012; MENDONÇA et al. 2013; COSTA et al., 2015a), comprovando a eficiência desses sistemas produtivos.

A resistência do solo à penetração de raízes e a aeração são parâmetros dinâmicos que são principalmente influenciados pela estrutura do solo, textura e teor de água. Interações entre o teor de água, a densidade aparente e aeração tornam difícil caracterizar os efeitos da compactação do solo considerando propriedades individuais do solo (CHEN et al., 2014). De acordo com Beutler et al. (2001), a RP aumenta com a compactação do solo, podendo ser restritiva ao crescimento radicular das culturas quando esses valores se encontram acima da faixa entre 1,5 a 3,0 MPa. Entretanto, tal fato não foi constatado na presente pesquisa, uma vez que não se observou reduções de produtividade das culturas (Tabela 19 e Tabela 20) ou então das raízes (Tabela 16) em função dos maiores valores de RP (Tabela 12).

Observou-se maior valor de RP no tratamento MB+ALI aos 6 meses, entretanto, houve uma redução significativa deste atributo aos 12 meses. A inclusão do feijão-guandu no sistema MBG+ALI, proporcionou valores de RP semelhantes ao sistema MBG+ALA. Tal fato demonstra que a inclusão desta leguminosa pode ser considerada como um excelente agente descompactador natural do solo, dispensando a adoção de operações mecanizadas de revolvimento nas camadas de 0,0 a 0,1 m (Tabela 12). Nos sistemas produtivos com pastagem, o sistema radicular das plantas forrageiras deixa grandes quantidades de canais devido ao grande volume de raízes deixados pelas gramíneas (SILVA; ROSOLEM, 2001), aumentando a resistência à penetração limitante para o crescimento radicular.

Na camada de 0,0 a 0,1 m o sistema MB+ALI apresentou a maior RP no 6º e 24º mês (Tabela 12). Provavelmente, a ausência do sistema radicular pivotante do feijão-guandu, no sistema MB+ALI, pode ter contribuído para redução do efeito descompactador promovido pelas raízes na camada de 0,05 a 0,1 m favorecendo o aumento da RP. Mesmo assim, os maiores valores encontrados para RP em MB+ALI não foram restritivos ao desenvolvimento das culturas, uma vez que não houve redução da produtividade de grãos de milho (PG) nesse sistema (Tabela 20).

A compactação do solo pode reduzir o desenvolvimento radicular da maioria das culturas, prejudicando suas produtividades (ROSOLEM et al., 2002). Com a compactação do solo ocorre a redução da porosidade total e o aumento da densidade do solo e da resistência à penetração das raízes, além de restringir o movimento da água e do ar ao longo do perfil (RICHART et al., 2005; CALONEGO et al., 2012; 2017).

Portanto, torna-se necessário a adoção de práticas de manejo que visem favorecer o desenvolvimento das raízes das culturas, tendo em vista a importância destas não somente em proporcionar a sustentação das plantas, uma vez que são responsáveis ainda pelas reservas de nutrientes utilizados para suprir os processos metabólicos do vegetal. Além disso, durante o processo de decomposição, podem aumentar os teores de matéria orgânica do solo, melhorar a infiltração de água e promover a abertura de espaços porosos, que beneficiam os cultivos subsequentes.

Em pesquisa realizada por Lanzasova et al. (2010), após 16 anos da adoção do SSD com diferentes rotações de culturas e adubos verdes, os autores observaram menor densidade do solo e maior volume total de poros e macroporosidade em comparação com o tratamento mantido sem cobertura do solo, demonstrando a importância da adoção de sistemas conservacionistas visando a melhoria na qualidade do solo e ainda a importância de pesquisas de longa duração.

#### **4.1.3 Curva de retenção de água no solo e índice S**

Na Figura 2 estão apresentadas as curvas de retenção de água no solo durante o 6º mês de avaliação para os sistemas de produção. Pode-se observar que no início das avaliações de solo (6 meses), o sistema MB+ALI proporcionou o menor conteúdo de água, principalmente nas camadas de 0,0 a 0,2 m, nas condições de solo saturado ( $\Psi=0$ ) até o potencial mátrico de -6 kPa (Figura 2 A, B e C). Este efeito pode ter relação com a redução da PT (Tabela 3) e MA sob esse sistema (Tabela 4), já que a presença de poros de maior diâmetro, favorece ao maior conteúdo de água, sob potenciais matriciais mais altos, indicando a presença de maior volume de poros totais e de macroporos (REICHARDT & TIMM, 2004).

Na camada de 0,0 a 0,05 m houve menor retenção de água no solo para MB+ALI mesmo em potenciais mátricos mais baixos (Figura 2 A). Provavelmente, a ausência do revolvimento do solo e/ou a ação do sistema radicular do feijão-guandu, possa ter contribuído não só para a diminuição do conteúdo de água disponível, mas também, para menor conteúdo de água fortemente adsorvida nos capilares do solo com poros de menor diâmetro.

Além disso, a camada de 0,0 a 0,05 m foi onde o solo apresentou maior RP aos 6 meses sob o sistema MB+ALI (Tabela 12). Segundo Reeve; Carter (1991), solos compactados caracterizam-se por apresentar menor retenção de água nas baixas

tensões (0 a -10 kPa), devido à redução promovida na porosidade, principalmente no volume de macroporos, que ficam preenchidos com água gravitacional nos maiores potenciais matriciais (potenciais menos negativos). De acordo com estes mesmos autores, é comum o aumento na retenção de água nos menores potenciais (potenciais mais negativos) devido ao incremento na microporosidade, aumentando o volume de água capilar.

Para Brady; Weil (1999) e Cavalieri et al. (2006), o aumento na densidade do solo promove aumento da água retida no ponto de murcha permanente (PMP), pois após o solo ser submetido à tensão de -15 kPa, a água restante apresenta-se retida por adsorção (com alta energia), ao redor dos colóides do solo. Assim, quanto maior o adensamento, maior será a quantidade de partículas por unidade de volume, aumentando a superfície de adsorção e, conseqüentemente, a umidade volumétrica do solo (BERG et al., 1997).

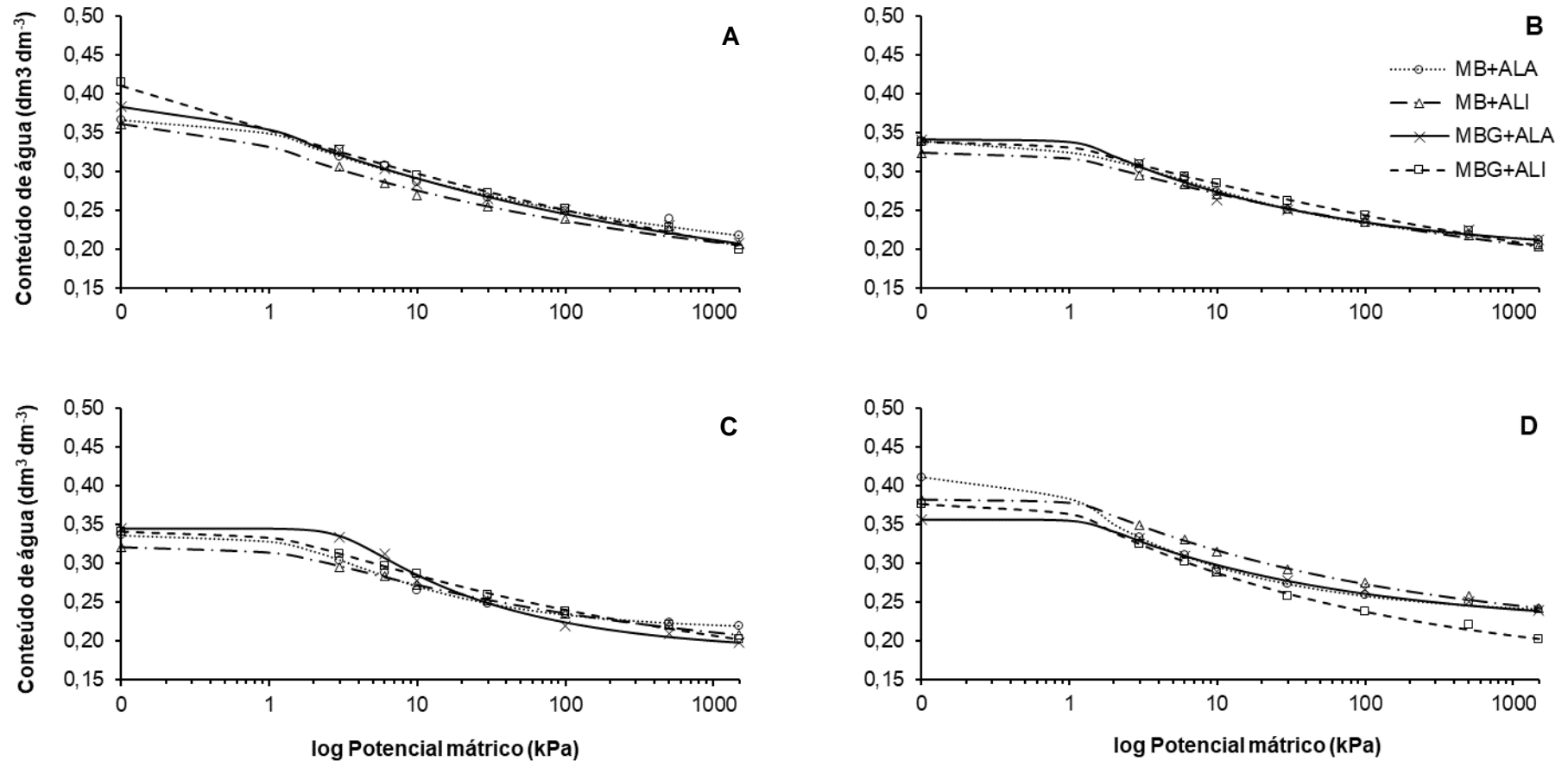
Na presente pesquisa, os sistemas que foram submetidos ao revolvimento superficial na sobressemeadura da aveia ou então ao uso da consorciação tripla com o feijão-guandu, demonstraram influência positiva sobre a capacidade de retenção de água no solo sob potenciais mátricos mais altos (próximos de  $\Psi=0$ ), principalmente nas camadas que vão de 0,0 até 0,2 m de profundidade (Figura 2 A, B e C).

Observando-se o sistema MBG+ALA na camada de 0,1 a 0,2 m, pode-se perceber uma alteração na conformidade da curva em relação aos demais sistemas e camadas do solo (Figura 2 C), demonstrando ser uma curva típica de solo menos compactado (REICHARDT; TIMM, 2004; DEXTER, 2004).

Na Figura 4, estão apresentados os valores calculados para o índice S, conforme modelo proposto por Dexter (2004). Percebe-se que houve um aumento do índice para o sistema MBG+ALA no 6º mês (Figura 4 C), atingindo valor de  $S=0,042$ . Segundo Dexter (2004), o valor de  $S=0,035$  é o limite mínimo para caracterizar o solo como tendo boa qualidade estrutural ao avaliar solos da Polônia e Inglaterra. No entanto, para Andrade; Stone (2009), ao testar o modelo proposto por Dexter (2004) em 2364 amostras de solos sob cerrado, nas regiões centro-oeste, norte e nordeste do Brasil, chegaram à conclusão de que o valor limite de  $S=0,045$  é indicado para a divisão entre solos com boa qualidade estrutural e com tendência de se tornarem degradados.

Na presente pesquisa, o sistema MBG+ALA apresentou influências positivas na qualidade estrutural do solo aos 6 meses após o início do experimento, sendo que tal fato se deve provavelmente, à inclusão da leguminosa no sistema. Além disso, é possível constatar que o aumento da qualidade estrutural do solo para retenção de água foi potencializado pelas operações de revolvimento superficial para incorporação das sementes da aveia distribuídas a lanço. Esses resultados corroboram com os observados por Calonego (2007), avaliando-se a CRA, sob cultivo de plantas de cobertura para recuperação de solo compactado. Esse mesmo autor conclui que o processo de revolvimento do solo com escarificação mecânica promove melhores condições físicas e físico-hídricas, como a redução da RP, aumento da porosidade de aeração de forma imediata.

**Figura 2.** Influência dos sistemas de produção na curva de retenção de água do solo aos 6 meses nas camadas de 0,0 a 0,05 (A); 0,05 a 0,1 (B); 0,1 a 0,2 (C); 0,2 a 0,4 (D) m



MB+ALA: consórcio de milho×capim-marandu seguido de sobressemeadura de aveia a lanço; MB+ALI: consórcio de milho×capim-marandu seguido de sobressemeadura de aveia em linha; MBG+ALA: consórcio de milho×capim-maranduxguandu seguido de sobressemeadura de aveia a lanço; MBG+ALI: consórcio de milho×capim-maranduxguandu seguido de sobressemeadura de aveia em linha.

Na Figura 3 estão apresentadas as curvas de retenção para o 24º mês de avaliação. Pode-se notar grande mudança na conformidade da curva de retenção de água no solo. Os sistemas MB+ALA e MBG+ALA, que passaram por uma gradagem niveladora para incorporação das sementes de aveia, mostraram ser eficientes na alteração estrutural do solo, refletindo em mudanças relevantes na conformidade da CRA.

Aos 24 meses houve maior conteúdo de água na condição de solo saturado, até o potencial matricial de -10 kPa nos sistemas MBG+ALA, MB+ALA e MBG+ALI (Figura 3). Foi observado aumento significativo dos valores de alguns atributos do solo, como a PT (Tabela 3) e da MA (Tabela 4). Esse resultado é um indicativo de que na presente pesquisa o aumento da PT e MA influenciaram positivamente a conformidade da curva de retenção de água no solo para esses sistemas.

Além disso, as curvas de retenção para os sistemas MB+ALAN e MBG+ALAN apresentaram maior índice S em relação aos demais sistemas avaliados em todas as camadas do solo (Figura 4). Segundo Dexter (2004), solos com boa qualidade estrutural apresentam curva característica com maior coeficiente angular (S), ou seja, maior ângulo formado pela tangente que passa pelo ponto de inflexão da curva.

As alterações promovidas pelos sistemas de produção MB+ALAN, MBG+ALA e MB+ALI na curva de retenção, são provavelmente decorrentes do revolvimento superficial do solo e/ou uso do feijão-guandu, assim como já observado anteriormente para outros atributos físicos.

As alterações relevantes na conformidade da CRA ocorreram em todo o perfil do solo (0,0 a 0,4 m) (Figura 3). Mesmo assim, ainda é possível constatar que houve diferença na conformidade da CRA entre os sistemas MB+ALA e MBG+ALA (ambos com revolvimento superficial) em todas as camadas (Figura 3).

Pode-se observar menor conteúdo de água no sistema MB+ALA em relação ao MBG+ALA, entre o potencial mátrico zero (solo saturado) até -10 kPa (Figura 3). Esse resultado pode ter relação com a ausência da leguminosa no sistema, uma vez que o sistema radicular pivotante do feijão-guandu integrado ao das gramíneas, pode ter sido mais eficiente em promover alterações nos atributos físicos do solo, como a MA. Portanto, a presença do feijão-guandu em SIPA mostrou ser mais eficiente em promover alterações positivas na retenção de água no solo, uma vez

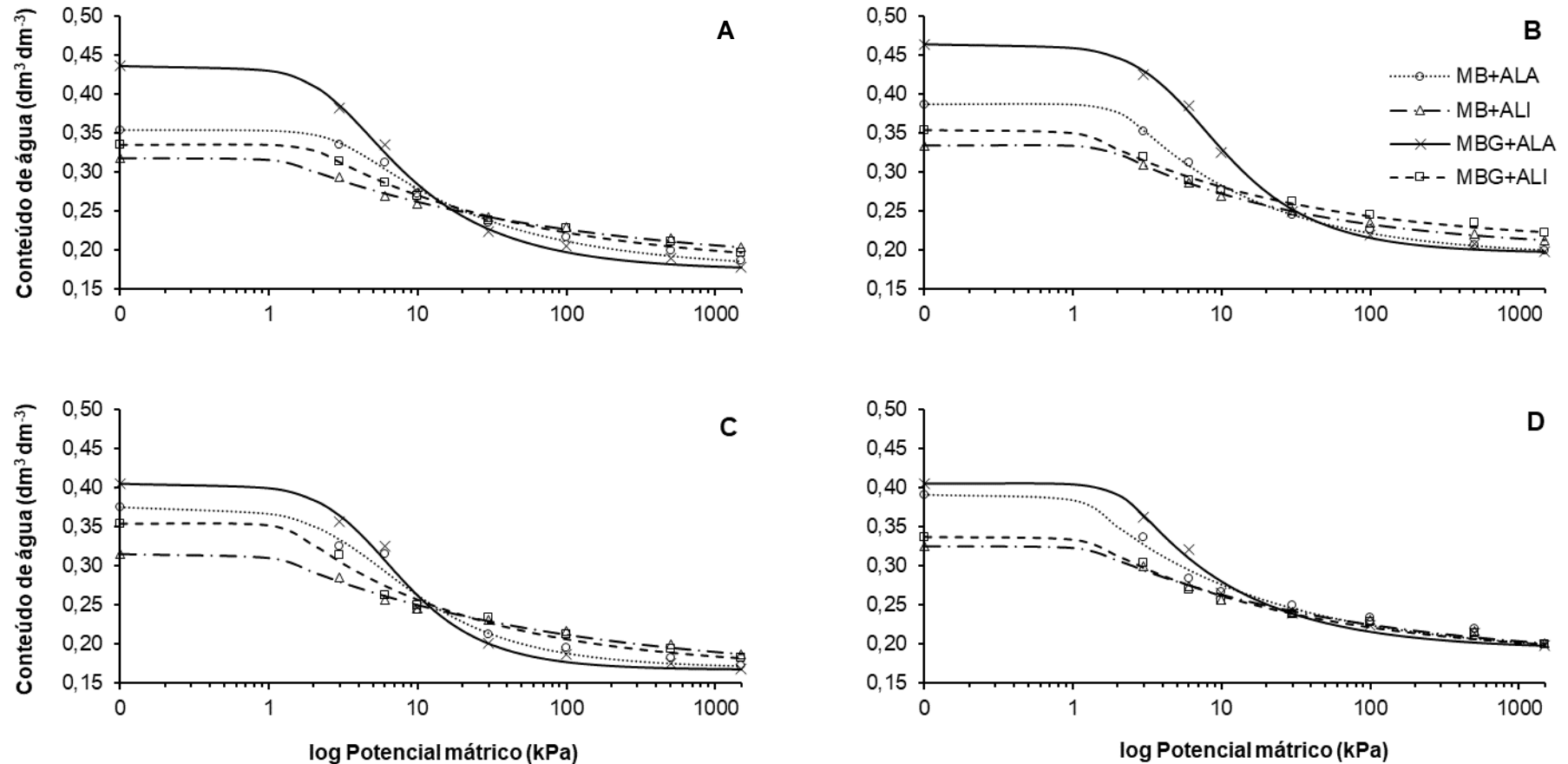
que, o aumento do índice S está diretamente correlacionado com o aumento da PT e MA (ARGENTON et al., 2005; SILVA et al., 2008; ANDRADE; STONE, 2009).

Pode-se perceber que nas camadas de 0,0 a 0,2 m houve menor conteúdo de água abaixo do potencial mátrico de -30 kPa nos sistemas MBG+ALA e MB+ALA (Figura 3). Isso pode estar associado ao aumento considerável da concentração de MA em detrimento ao de MI. Portanto, além de haver maior conteúdo de água em maiores potenciais matriciais, houve também, uma redução considerável na capacidade de retenção de água em potenciais menores que -30 kPa, onde a água é mais fortemente retida nos poros menores que 0,2  $\mu\text{m}$ .

Embora não tenha havido diferença significativa entre os sistemas de produção para a MI (Tabela 5), os resultados obtidos através da análise da curva de retenção de água no solo aos 24 meses, indicam provável redução da MI para os sistemas MBG+ALA e MB+ALA nas camadas de 0,0 a 0,2 m (Figura 3 A, B e C).

No entanto, foi observado maior conteúdo de água em potenciais mais baixos (menores que -30 kPa) para o sistema MB+ALI aos 24 meses para as camadas de 0,0 a 0,2 m (Figura 3, A, B e C). Esse resultado demonstra aumento considerável da força de retenção de água no solo sob o sistema MB+ALI. No entanto, essa condição não prejudicou o desenvolvimento das culturas sob esse sistema, uma vez que não houve redução na produtividade de massa seca de silagem (MSS) (Tabela 19) e da produtividade de grãos (PG) (Tabela 20). Essa condição pode estar relacionada com a menor mobilização do solo no sistema MB+ALI, devido à ausência da gradagem niveladora e do sistema radicular pivotante do feijão-guandu.

**Figura 3.** Influência dos sistemas de produção na curva de retenção de água do solo aos 24 meses nas camadas de 0,0 a 0,05 (A); 0,05 a 0,1 (B); 0,1 a 0,2 (C); 0,2 a 0,4 (D) m



MB+ALA: consórcio de milho×capim-marandu seguido de sobressemeadura de aveia a lanço; MB+ALI: consórcio de milho×capim-marandu seguido de sobressemeadura de aveia em linha; MBG+ALA: consórcio de milho×capim-marandu×feijão-guandu seguido de sobressemeadura de aveia a lanço; MBG+ALI: consórcio de milho×capim-marandu×feijão-guandu seguido de sobressemeadura de aveia em linha.

Pode-se observar aumento considerável no índice S para os sistemas MBG+ALA, MB+ALA e MBG+ALI (Figura 4). Mesmo com ausência do revolvimento superficial do solo, é possível perceber um aumento considerável da inclinação no ponto de inflexão da curva de retenção para o sistema MBG+ALI, principalmente nas camadas de 0,0 a 0,2 m. Isso demonstra que a inclusão da leguminosa por si só é capaz de alterar significativamente a conformidade da curva de retenção, sem o revolvimento superficial, assim como observado para a RP.

O sistema MB+ALI apresentou menores influências no índice S, confirmando a hipótese de que a presença da leguminosa no sistema foi determinante para melhoria da retenção de água no solo (Figura 4). Além disso, fica claro que associar a inclusão do feijão-guandu e revolvimento superficial, potencializou as alterações nos atributos físicos, como a MA, PT e curva de retenção de água nos sistemas integrados de produção.

O revolvimento superficial com grade niveladora, promoveram mudanças consideráveis na porosidade e retenção de água no solo, principalmente quando associado à inclusão do feijão-guandu. No entanto, é necessário ponderar que outros atributos como o DMP (Tabela 8), DMG (Tabela 9), AGR>2 (Tabela 10), foram negativamente influenciados pela gradagem. Em pesquisa realizada por Tormena et al. (2008) avaliando-se o índice S em um Latossolo Vermelho distroférico sob SSD e plantio convencional (PC), observaram que houve diminuição do índice S sob SSD. Os autores atribuíram este efeito à ausência de revolvimento do solo em SSD que promove adensamento combinado com a diminuição de poros maiores, diferentemente do que ocorre com o PC.

Portanto, adotar SIPA com uso de técnicas de consorciação tripla com o feijão-guandu e sem operações de revolvimento superficial, são de fundamental importância para manter a qualidade estrutural do solo e melhorar as condições de retenção de água, o que pode favorecer o desenvolvimento e produção das culturas em sistema de rotação.

Durante o 24º mês, foi possível constatar que os sistemas MB+ALA e MBG+ALA atingiram índice S acima de 0,045 (Figura 4). Esse valor é considerado como referência para a divisão entre solos com boa qualidade estrutural e com tendência de se tornarem degradados para regiões de cerrado no Brasil (ANDRADE; STONE, 2009).

Observou-se que após 24 meses, em todas as camadas avaliadas, o sistema MBG+ALI apresentou aumento do índice S, com valores acima de 0,035 (Figura 4). Esse valor é considerado como solos fisicamente adequados estruturalmente (DEXTER, 2004), reforçando a hipótese de que a inclusão do feijão-guandu é suficiente para promover alterações biofísicas no solo.

É possível perceber que no sistema MB+ALI, também ocorreu aumento significativo da RP no 6º mês nas camadas de 0,0 a 0,1 m e no 24º mês apenas na camada de 0,05 a 0,1 m (Tabela 12). Provavelmente, esse resultado é decorrente da presença de forças atuantes sobre o solo, como o pisoteio dos animais, que associado ao tráfego de máquinas (semeadura das culturas e colheita da silagem), podem ter causado maior impacto negativo na RP, porosidade e consequentemente na retenção de água no solo.

Outro fator que pode ter contribuído para potencializar os efeitos negativos das forças físicas atuantes na superfície do solo sob sistema MB+ALI, está relacionado com a menor quantidade de massa seca residual do processo de colheita da silagem neste sistema (Tabela 21) e massa seca vegetal no período de novembro de 2014 (Tabela 22).

Na presente pesquisa pode-se observar que os valores de S do sistema MB+ALI em todas as camadas avaliadas (Figura 4), permaneceram acima do valor mínimo de  $S=0,020$  proposto por Dexter (2004), como sendo o limite mínimo para solos com baixa qualidade estrutural. Em contrapartida, os valores de S em MB+ALI, permaneceram abaixo do valor mínimo  $S=0,035$ , que indica presença de solos inteiramente degradados segundo Andrade; Stone (2009).

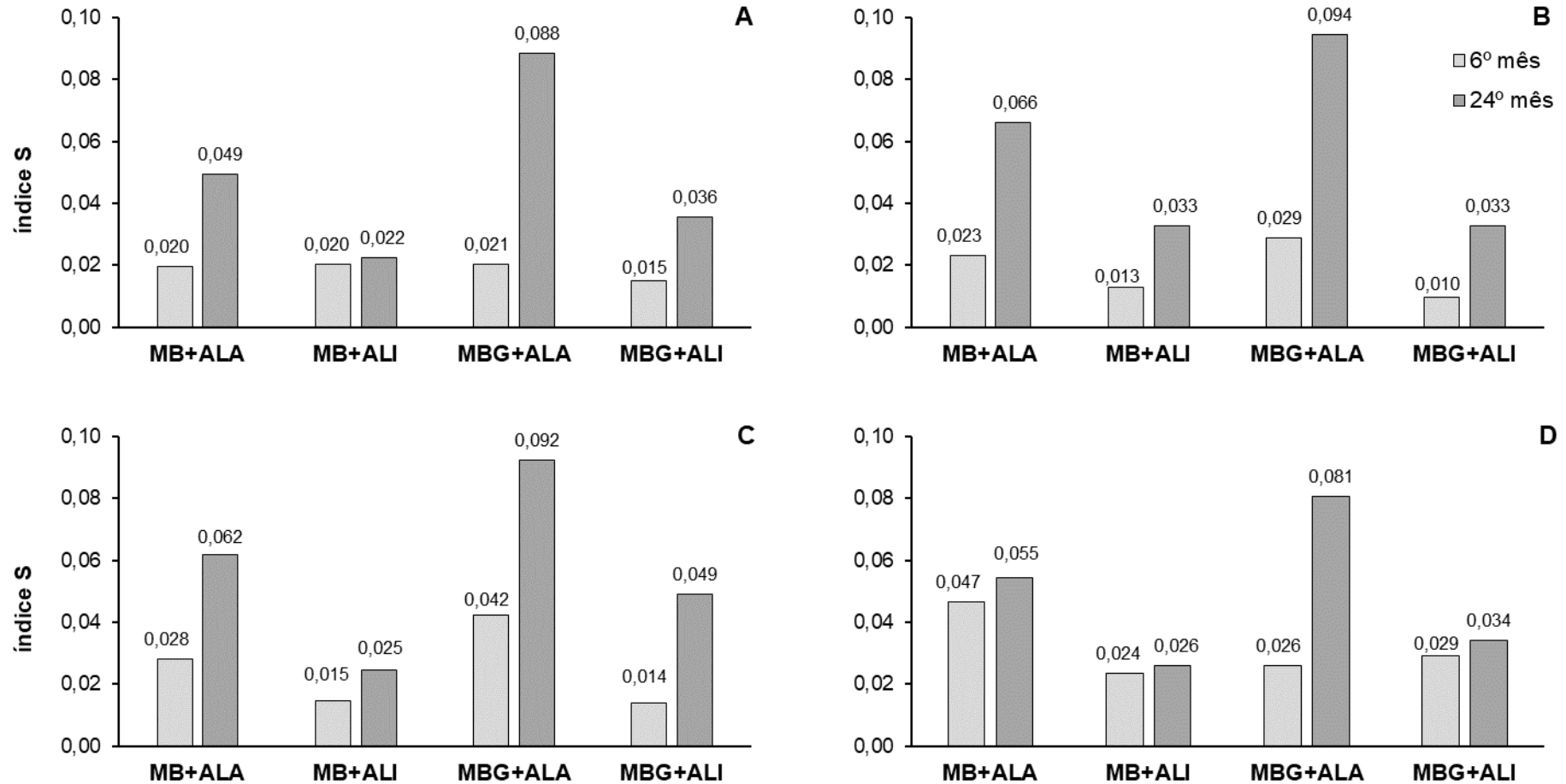
Sabe-se que o uso da consorciação entre milhoxcapim-marandu em sistemas integrados, são práticas conservacionistas consagradas. Portanto, seria prematuro afirmar que o sistema MB+ALI pode ser considerado como degradado, uma vez que não impactou na produtividade das culturas. Portanto, são necessários estudos mais específicos e com maior tempo de avaliação para elucidar as influências específicas de SIPA no índice S, bem como estabelecer valores referências para o mesmo nestes sistemas produtivos. Portanto, os resultados encontrados na presente pesquisa, permitem inferir que as alterações condicionadas pelo sistema MB+ALI são características de um solo com menor qualidade estrutural, sem impactar a PG do milho (Tabela 20).

Na pesquisa de Cavalieri et al. (2009), avaliando-se efeitos a longo prazo do SSD nas propriedades físicas dinâmicas do solo no estado do Paraná, Brasil, constataram que em todas as camadas avaliadas (0,0 a 0,5 m), o SSD foi considerado como tendo boa estrutura com valores de S acima de 0,035, corroborando com Dexter (2004).

Neste contexto, a FAO (2017) destaca a necessidade de introdução, adaptação e implementação de boas práticas agrícolas associadas com ambientes propícios de produção animal e vegetal (questões ambientais e de saúde humana), a fim de manter a segurança alimentar local e internacional e os meios de subsistência da população de maneira sustentável. Assim, a intensificação da produção agrícola e pecuária, em SIPA conduzidos por pequenos produtores, bem como, em outros sistemas intensivos ou extensivos de produção agrícola, é essencial para sustentabilidade ambiental e melhoria das condições de desenvolvimento humano, proporcionando mudanças sociais e econômicas necessárias nas áreas agrícolas.

Existem diversos trabalhos demonstrando que a integração dos sistemas de produção agrícola e pecuária bem manejados aumenta a diversidade, juntamente com a sustentabilidade ambiental, de ambos os setores (COSTA et al., 2012b; 2016; 2017; FRANZLUEBBERS; STUEDEMANN, 2014; CRUSCIOL et al., 2014; 2015; MATEUS et al., 2016; PARIZ et al., 2016, 2017a, b, c), ao mesmo tempo em que oferece oportunidades para o aumento da produção global e da economia da agricultura. Isso reduzirá a preferência por sistemas de produção pecuários especializados, tendo em vista os seus problemas com a sustentabilidade ambiental e econômica.

**Figura 4.** Valores do Índice S dos sistemas de produção no 6º e 24º mês de experimento nas camadas de 0,0 - 0,05 (A); 0,05 - 0,1 (B); 0,1 - 0,2 (C) e 0,2 - 0,4 (D) m



MB+ALA: consórcio de milhocapim-marandú seguido de sobressemeadura de aveia a lanço; MB+ALI: consórcio de milhocapim-marandú seguido de sobressemeadura de aveia em linha; MBG+ALA: consórcio de milhocapim-marandú-feijão-guandu seguido de sobressemeadura de aveia a lanço; MBG+ALI: consórcio de milhocapim-marandú-feijão-guandu seguido de sobressemeadura de aveia em linha.

## 4.2 Química do solo

Os resultados da análise de variância para acidez do solo (pH), hidrogênio+alumínio (H+Al), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), enxofre (S), nitrogênio (N) e carbono (C) estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Valores *p* do teste de F das variáveis acidez do solo (pH), hidrogênio+alumínio (H+Al), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), enxofre (S), nitrogênio (N) e carbono (C) avaliadas nas camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2; 0,2 - 0,4 m.

F.V. <sup>§</sup>	pH	H+Al	K	Ca	Mg	P	S	N	C
<i>Camada 0,0 - 0,05 m</i>									
Trat. (A)	0,167	0,112	0,003	0,054	0,313	0,007	0,001	0,011	0,803
Época (B)	0,346	0,574	0,407	0,018	0,003	0,329	<0,001	<0,001	<0,001
A X B	0,434	0,651	0,7826	0,388	0,673	0,051	0,063	0,086	0,056
<i>Camada 0,05 - 0,1 m</i>									
Trat. (A)	0,438	0,154	0,002	0,052	0,717	0,033	0,010	0,013	0,961
Época (B)	0,283	0,039	0,093	0,171	0,032	0,177	0,119	<0,001	0,054
A X B	0,863	0,803	0,078	0,699	0,747	0,271	0,949	0,067	0,296
<i>Camada 0,1 - 0,2 m</i>									
Trat. (A)	0,295	0,286	<0,001	0,015	0,636	0,025	0,008	0,911	0,028
Época (B)	0,026	0,005	0,033	0,114	0,003	0,005	0,005	<0,001	0,678
A X B	0,543	0,205	0,678	0,384	0,112	0,140	<0,001	0,051	0,196
<i>Camada 0,2 - 0,4 m</i>									
Trat. (A)	0,274	0,093	0,055	0,050	0,434	0,093	0,037	<0,001	0,083
Época (B)	0,650	0,367	<0,001	0,829	0,363	<0,001	0,826	<0,001	0,005
A X B	0,065	0,086	0,055	0,388	0,143	0,083	0,060	0,094	0,087

<sup>§</sup>Fonte de variação

De modo geral, pode-se notar que os teores de Ca, Mg, P, S e K são considerados de médio a alto segundo Raij et al. (1996) (Tabela 14 e Tabela 15). Na camada de 0,2 a 0,4 m há redução dos teores de Ca, Mg e K com valores considerados de baixo a médio. O pH variou de 4,39 a 5,05 que é considerado como alta acidez. Os teores de P abaixo da camada de 0,2 m são considerados muito baixos, o que já era esperado devido à baixa mobilidade desse elemento no solo, resultando em maiores teores em camadas superficiais, onde há adição desse elemento na forma mineral e orgânica (MALAVOLTA, 2006).

Tabela 14. Efeito dos sistemas de produção e das épocas de avaliação na acidez do solo (pH) e nos teores de hidrogênio+alumínio (H+Al), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) avaliados nas camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2; 0,2 - 0,4 m.

Fonte de variação	pH (CaCl <sub>2</sub> )	H+Al	K	Ca	Mg
	-	----- mmolc dm <sup>-3</sup> -----			
Sistema de produção		<i>Camada 0,0 - 0,05 m</i>			
MB+ALA	5,04	33,31	4,05 a	28,66	14,20
MB+ALI	5,06	31,71	3,08 b	33,92	11,59
MBG+ALA	5,01	35,21	4,43 a	30,17	12,31
MBG+ALI	4,83	38,76	2,87 b	23,67	11,78
Época (meses)					
6	5,02	35,27	3,94	35,44 a	15,65 a
12	4,98	32,98	3,76	29,82 ab	12,93 ab
18	4,98	33,85	3,52	27,49 b	11,62 bc
24	4,96	36,89	3,21	23,67 b	9,67 c
Sistema de produção		<i>Camada 0,05 - 0,1 m</i>			
MB+ALA	4,71	41,24	2,30 b	19,85	9,63
MB+ALI	4,86	36,03	1,98 b	25,85	8,66
MBG+ALA	4,75	41,30	3,06 a	23,61	8,94
MBG+ALI	4,71	41,12	2,16 b	20,87	9,79
Época (meses)					
6	4,84	39,41 ab	2,58	25,64	11,15 a
12	4,77	36,61 b	2,00	22,40	9,60 ab
18	4,77	39,14 ab	2,25	20,97	8,04 b
24	4,65	44,55 a	2,66	21,16	8,24 b
Sistema de produção		<i>Camada 0,1 - 0,2 m</i>			
MB+ALA	4,71	42,17	1,49 a	16,84 c	7,77
MB+ALI	4,87	36,97	1,15 b	22,44 ab	7,76
MBG+ALA	4,82	37,58	1,76 a	24,13 a	8,76
MBG+ALI	4,81	38,21	1,03 b	18,36 bc	7,81
Época (meses)					
6	4,85 ab	38,63 a	1,53 a	22,28	9,43 a
12	4,94 a	32,43 b	1,14 b	22,84	9,08 a
18	4,71 b	40,94 a	1,49 a	18,96	7,17 b
24	4,71 b	42,91 a	1,27 ab	17,68	6,41 b
Sistema de produção		<i>Camada 0,2 - 0,4 m</i>			
MB+ALA	4,39	62,30	0,97	10,47 b	5,57
MB+ALI	4,52	53,65	0,95	15,56 a	6,47
MBG+ALA	4,56	52,94	1,05	12,57 ab	6,72
MBG+ALI	4,58	49,52	0,94	16,27 a	7,10
Época (meses)					
6	4,54	53,57	1,04 a	14,40	7,29
12	4,53	51,14	0,83 b	13,81	6,68
18	4,55	53,77	1,03 a	12,46	5,63
24	4,43	57,93	1,00 a	14,20	6,25

Médias seguidas de uma mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ).

Em SIPA, têm sido observadas melhorias nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (SPERA et al., 2010a; SANTOS et al., 2011; MENDONÇA et al., 2013; COSTA et al., 2015a), tendo em vista principalmente o efeito das adubações nas culturas, assim como a intensificação da utilização da área agrícola com cultivos

realizados durante todo o ano, em que a rotação de culturas permite a inclusão de espécies com diferentes sistemas radiculares, além de resíduos vegetais com diferentes relações C/N, o que contribui para alterações das taxas de decomposição e ciclagem de nutrientes.

Observa-se que na camada de 0,1 a 0,2 m houve influência das épocas de avaliação no índice de pH do solo e na acidez potencial (H+Al) (Tabela 14), sendo que os menores índices de pH do solo ocorreram durante o 18<sup>o</sup> e 24<sup>o</sup> mês após o início do experimento. Enquanto isso, verificou-se que a acidez potencial teve comportamento inverso, ou seja, menores valores foram obtidos a medida que o pH aumentou. Este comportamento é esperado, tendo em vista que o maior valor de pH significa menor quantidade de íons H<sup>+</sup> em detrimento dos íons OH<sup>-</sup> na solução do solo, diminuindo assim os valores da acidez potencial.

Os teores de Ca e Mg variaram com a oscilação do pH do solo, a medida em que os teores desses cátions diminuíram, houve aumento da acidez (Tabela 14). Na camada de 0,0 a 0,05 m os maiores teores de Ca ocorreram durante os dois primeiros períodos de avaliação (6<sup>o</sup> e 12<sup>o</sup> mês), assim como para os maiores teores de Mg nestes mesmos períodos nas camadas de 0,0 a 0,2 m.

É importante enfatizar que os SIPA são caracterizados pela maior complexidade e por serem sistemas mais intensivos de produção. Na presente pesquisa, com a produção de silagem, o solo fica mais sujeito à acidificação devido à elevada extração de nutrientes, que promove a liberação de sítios de adsorção, podendo ocorrer maior concentração de íons H<sup>+</sup>, consequente aumentando a acidez, como o observado para o 18<sup>o</sup> e 24<sup>o</sup> mês de avaliação (Tabela 14).

A quantidade de MOS também é um fator importante para reduzir a acidez, principalmente os níveis de Al. Em SSD, a adição de palha ajuda a melhorar a qualidade do solo (CRUSCIOL et al., 2016a, b e CALONEGO et al., 2017). Entretanto, deve-se considerar que a palhada das culturas se decompõe rapidamente em regiões tropicais devido principalmente a fatores edafoclimáticos (PARIZ et al., 2011; COSTA et al., 2014). Tal fato pode reduzir a persistência da palha, que afeta a qualidade do solo, influenciando assim, a sustentabilidade do SSD.

Os maiores teores de Ca e Mg durante o 6<sup>o</sup> e 12<sup>o</sup> mês na camada de 0,0 a 0,05 m, podem ser decorrentes da maior quantidade de massa seca residual da silagem (MSRS) (Tabela 21) produzida na safra 2013/2014 (6<sup>o</sup> e 12<sup>o</sup> mês). Durante os

processos de decomposição e mineralização dos resíduos vegetais, ocorre a liberação desses cátions. Além disso a medida que o pH se eleva, menor concentração de íons  $H^+$  ocorrem na solução do solo, permitindo que os sítios de troca do solo e a superfície dos minerais sejam ocupados pelos cátions Ca e Mg (Malavolta, 2006).

Portanto, a menor inclusão de MSRS pode estar alterando os teores de Ca e Mg no solo, bem como promovendo variações no pH na presente pesquisa. Alguns resultados de pesquisas evidenciam algumas elevações do pH do solo em função da adição de resíduos vegetais (FRANCHINI et al., 2001; PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Esse resultado seria decorrente da complexação dos  $H^+$  e  $Al^{3+}$  livres com compostos orgânicos aniônicos dos resíduos e do aumento da saturação da CTC do solo pelos íons Ca, Mg e K adicionados via resíduo vegetal, o que pode reduzir a acidez potencial. As reações de troca de ligantes entre ânions orgânicos e os grupos  $OH^-$  terminais dos óxidos de Fe e Al têm sido propostas como causas da elevação do valor de pH do solo após a adição dos resíduos (FRANCHINI et al., 2001).

O SSD é uma excelente alternativa para os sistemas produtivos atuais. Diversos autores verificaram que a presença de resíduos vegetais na superfície do solo podem proporcionar aumento nos valores de pH, dos teores de Ca e Mg trocáveis em camadas mais profundas do solo em detrimento ao teor de Al trocáveis, além de aumento nos teores de MO, C orgânico e de P nas camadas mais superficiais do solo (CAIRES et al., 1998; SILVEIRA; STONE, 2001; FRANZLUEBBERS, 2002; SANTOS et al., 2003; LOURENTE et al., 2010; CASTRO et al., 2015; CRUSCIOL et al., 2015; COSTA et al., 2015a).

Durante o 6º e 12º mês para a camada de 0,0 a 0,05 m, ocorreram os maiores teores de carbono (Tabela 15). Como o carbono está intimamente relacionado com os teores de MOS, confirma-se que as maiores quantidades de MSRS na safra 2013/2014 (Tabela 21), possam ter contribuído para aumentar os teores de Ca e Mg, não só pelos processos de decomposição e mineralização dos resíduos vegetais, mas também pela maior retenção desses cátions nos sítios de adsorção da MOS.

Os menores teores de cálcio encontrados nas camadas de 0,1 a 0,4 m, no tratamento MB+ALA, pode estar relacionado à menor inclusão de material vegetal no sistema pela ausência do feijão-guandu, reduzindo as quantidades deste nutriente no solo. Pode-se observar que houve menor produtividade de massa seca de silagem (MSS) na safra 2013/2014 (Tabela 19), bem como menor quantidade de

resíduos da silagem (MSRS) (Tabela 21). Provavelmente a ausência do feijão-guandu promoveu maior impacto aos teores de cálcio pelo menor aporte de material vegetal no sistema.

Observando-se de forma geral os teores de K entre os sistemas de produção para a camada de 0,0 a 0,2 m, verificou-se que os maiores valores ocorreram sob MB+ALA e MBG+ALA (Tabela 14). Tal fato se deve ao revolvimento superficial promovido pela grade niveladora para incorporação das sementes de aveia, potencializando o processo de decomposição e disponibilização do K para o solo. Esse resultado demonstra que a semeadura da aveia a lanço, com processo de revolvimento do solo para incorporação da semente, pode ter ocultado a dinâmica natural de lixiviação do K no sistema solo-planta. Nota-se ainda que os sistemas MBG+ALA e MBG+ALI proporcionaram maiores quantidade de MSRS, no entanto, isso não proporcionou maiores teores de K, uma vez que este é facilmente liberado do material vegetal.

Segundo Calonego et al. (2005), trabalhando com milho, demonstraram que à medida que a planta dessecada senesce e recebe chuvas, libera potássio, que é retornado ao solo. O aumento na produtividade de matéria seca das culturas, pela melhoria da fertilidade e pelo bom uso do solo, intensifica a ciclagem de K (SANTI et al., 2003; ROSSATO, 2004; FERREIRA et al. 2011).

Entretanto, deve-se enfatizar a contribuição do K liberado pelos resíduos vegetais, com importante papel na ciclagem desse nutriente nos sistemas de produção, sendo em torno de 80 % para gramíneas e 90 % para leguminosas (SANTOS et al., 2008; COSTA et al., 2014; 2015a). O K encontra-se, predominantemente como cátion livre ou como cátion adsorvido e pode, facilmente, ser deslocado das células ou dos tecidos da planta (LINDHAUER, 1985).

Em SIPA não há período de pousio entre uma cultura e outra, ou seja, a área é cultivada durante praticamente todos os meses do ano (safra e entressafra). Assim, o K absorvido pelas culturas, permanece a maior parte do tempo no tecido vegetal, protegido de perdas por erosão e lixiviação. As maiores perdas de potássio nestes sistemas produtivos, se devem principalmente, pela colheita de grãos e colheita da parte aérea das culturas, como no caso da silagem, assim como o relatado por Costa et al. (2015a).

Portanto, o uso de aveia a lanço com incorporação das sementes via grade niveladora na presente pesquisa, notadamente condicionou o aumento da liberação

de K do material vegetal em superfície, incrementando os teores deste no solo (Tabela 14). No entanto, este efeito, embora tenha aumentado os níveis do K no solo, deve ser tratado com atenção, pois a acelerada liberação do K, intensificada pelas operações de revolvimento, pode também favorecer a degradação e lixiviação desse nutriente a longo prazo, devido a sua alta mobilidade no solo.

De acordo com Kluthcouski et al. (2007), SIPA sob SSD tem demonstrado maior eficiência em preservar os recursos naturais e explorar racionalmente os solos, uma vez que são considerados eficientes em maior proteção do solo, principalmente devido ao maior aporte de resíduos vegetais no sistema de produção ao longo dos cultivos sucessivos (COSTA et al., 2014; 2015a, MATEUS et al., 2016; PARIZ et al., 2011; 2017a). Em pesquisa realizada por Kliemann et al., (2006) os autores enfatizam a importância da permanência da palhada na superfície do solo, uma vez que a manutenção desta proporciona a proteção do sistema solo-planta, beneficiando a manutenção da umidade, favorecendo a biota do solo e a ciclagem de nutrientes.

Houve diferenças nos teores de fósforo do solo, entre os sistemas de produção, nas camadas de 0,05 a 0,2 m (Tabela 15). Nas camadas de 0,0 a 0,1 m, de maneira geral, os maiores teores de fósforo ocorreram sob os sistemas MB+ALA e MBG+ALA, provavelmente devido a ação da gradagem, que pode ter acelerado o processo de mineralização deste nutriente, assim como já observado para o conteúdo de K no solo.

As espécies de plantas nestes sistemas produtivos proporcionam maior variedade de espécies cultivadas, assim como variam em produção de biomassa e diferentes sistemas radiculares que podem explorar nutrientes em diferentes profundidades do solo (ROSOLEM; CALONEGO 2013; RAPHAEL et al., 2016).

O maior teor de P do solo em SSD pode ser devido também à adição desse nutriente nas camadas superficiais através das adubações minerais, ao efeito de concentração, às reações de adsorção e à sua reciclagem pela mineralização dos resíduos vegetais inseridos no sistema (ANGHINONI, 2007).

O não revolvimento do solo reduz o contato entre colóides do solo e o íon fosfato, diminuindo as reações de adsorção. Por outro lado, a mineralização lenta e gradual dos resíduos orgânicos proporciona a liberação e a redistribuição das formas orgânicas de P, mais móveis no solo e menos susceptíveis às reações de adsorção (ANGHINONI, 2007). Desta forma, o mecanismo de adsorção do fósforo no solo

pode ter sido predominantemente influenciado pela gradagem que promove o fracionamento físico dos resíduos vegetais, aumentando a superfície específica de contato que facilita os processos de decomposição e adsorção de nutrientes nos colóides do solo.

Tabela 15. Efeito dos sistemas de produção e das épocas nos teores de fósforo (P), enxofre (S), nitrogênio (N) e carbono (C) avaliadas nas camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2; 0,2 - 0,4 m.

Fonte de variação	P <sub>(resina)</sub> ----- mg dm <sup>-3</sup> -----	S	N	C
			----- g dm <sup>-3</sup> -----	
Sistema de produção		<i>Camada 0,0 - 0,05 m</i>		
MB+ALA	34,32 a	15,94 a	1,27 a	18,16
MB+ALI	30,66 ab	10,33 b	1,21 a	18,33
MBG+ALA	34,66 a	11,43 b	1,11 b	18,41
MBG+ALI	25,47 b	11,12 b	1,20 ab	18,84
Época (meses)				
6	29,84	13,02 b	1,18 b	19,92 a
12	29,04	16,67 a	1,44 a	19,45 ab
18	32,61	11,05 b	1,09 bc	18,05 b
24	33,61	8,07 c	1,07 c	16,53 c
Sistema de produção		<i>Camada 0,05 - 0,1 m</i>		
MB+ALA	37,92 ab	20,90 a	1,15 a	16,21
MB+ALI	29,92 b	12,37 b	1,08 b	16,10
MBG+ALA	55,27 a	14,39 b	1,05 b	16,44
MBG+ALI	18,25 b	11,18 b	1,09 ab	16,23
Época (meses)				
6	27,37	16,10	1,11	16,40
12	23,71	18,33	1,27	16,67
18	45,94	12,13	1,00	16,76
24	44,34	12,27	0,99	15,15
Sistema de produção		<i>Camada 0,1 - 0,2 m</i>		
MB+ALA	7,60 ab	16,84 a	1,03	14,19 b
MB+ALI	8,39 a	15,77 ab	1,03	15,30 a
MBG+ALA	9,08 a	12,71 bc	1,02	15,66 a
MBG+ALI	5,77 b	12,26 c	1,01	15,32 a
Época (meses)				
6	7,36 b	17,55 a	1,08 b	14,81
12	6,06 b	12,93 b	1,16 a	15,11
18	10,12 a	12,25 b	0,88 d	15,12
24	7,29 b	14,85 ab	0,97 c	15,42
Sistema de produção		<i>Camada 0,2 - 0,4 m</i>		
MB+ALA	3,33	40,39 a	0,97 bc	14,30
MB+ALI	3,67	31,38 ab	1,04 ab	15,78
MBG+ALA	2,87	27,77 b	0,92 c	14,80
MBG+ALI	3,56	25,80 b	1,08 a	14,93
Época (meses)				
6	3,47 a	31,35	1,06 ab	14,50 b
12	2,19 b	32,73	1,13 a	14,71 b
18	3,93 a	28,48	0,79 c	14,35 b
24	3,83 a	32,78	1,03 b	16,24 a

Médias seguidas de uma mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ).

A decomposição de resíduos vegetais das culturas que constituem o sistema produtivo é uma variável importante na ciclagem de nutrientes em SIPA sob SSD. Desta forma, o conhecimento de sua dinâmica é fundamental para a compreensão do processo, uma vez que a ciclagem resultará em utilização mais eficiente dos nutrientes para as culturas cultivadas em sucessão e, principalmente na redução dos impactos negativos causados ao ambiente.

As taxas de decomposição das plantas de cobertura dependem da natureza do material vegetal, do volume, da fertilidade do solo, do manejo da cobertura e das condições climáticas, representadas, principalmente, pela pluviosidade e temperatura (KLIEMANN et al., 2006; PARIZ et al., 2011; COSTA et al., 2014). Dessa forma, torna-se importante salientar as elevadas quantidades de nutrientes que podem ser liberadas e utilizadas por culturas em sucessão, por ficarem fixadas em compostos orgânicos (SILVA; MENDONÇA, 2007).

De forma geral, nota-se aumento dos teores de S em profundidade (Tabela 15), que pode estar associado à precipitação do sulfato ligado ao alumínio que desce no perfil devido ao maior peso molecular. Além disso, pode-se perceber que os maiores teores de S ocorrem a medida que os teores de P diminuem ao longo do perfil do solo (Tabela 15). O P pode estar influenciando, o deslocamento do sulfato em profundidade, pois há competição pelos sítios de adsorção, tendo em vista que o fosfato tem afinidade considerada forte, enquanto o sulfato moderado (HSU, 1989), resultando na redução dos teores de S em superfície (Tabela 14). Segundo Malavolta (2006), a energia com que os ânions são adsorvidos é função da valência e do grau de hidratação, obedecendo a seguinte ordem decrescente:  $\text{H}_2\text{PO}_4 > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}$ . Deve-se considerar, também, que houve adição de fosfato por conta da adubação na semeadura dos cultivos, portanto, há maior chance de ocorrer dessorção do sulfato onde a concentração de P é alta.

O menor teor de nitrogênio ocorreu sob sistema MBG+ALA que não diferiu do sistema MBG+ALI, provavelmente devido à maior demanda por N, para suprir o ciclo de decomposição do material orgânico mais abundante na consorciação tripla (Tabela 15). Deve-se considerar que houve maior quantidade MSRS (Tabela 21) e de massa seca vegetal (MSV) em novembro de 2014 (Tabela 22) nos sistemas MBG+ALA e MBG+ALI. Além disso, as maiores quantidades de MSV em períodos de entressafra e de MSRS sob os sistemas MBG+ALA e MBG+ALI, podem ter

condicionado o aumento da demanda biológica por nitrogênio para manutenção dos processos de decomposição biológica do material vegetal.

Para os teores de carbono no solo, houve efeito significativo dos sistemas de produção apenas na camada de 0,1 a 0,2 m, com menor valor no sistema MB+ALA (Tabela 15) provavelmente pelo fato de haver menor quantidade de MSRS, com menores aportes de carbono ao solo (Tabela 21). O acúmulo de carbono em solos sob SSD em SIPA é fator de extrema relevância, tendo em vista a necessidade de, nos cultivos atuais, a busca por técnicas que visem a qualidade e sustentabilidade ambiental.

Áreas sob intenso revolvimento do solo com culturas anuais sob sistemas convencionais, tendem a apresentar menor estoque de carbono em relação a sistema conservacionistas (ZINN et al., 2005) devido à exposição da matéria orgânica ao ataque dos microrganismos pelo rompimento dos macroagregados, ocasionando a liberação do carbono armazenado.

Pode-se observar que na camada de 0,0 a 0,05 m os teores de carbono decaíram com o passar do tempo (Tabela 15). Provavelmente os sistemas de produção estão promovendo diminuição dos teores de carbono que está intimamente relacionado com os teores de MOS, devido a alta extração de material vegetal que culminou em menor quantidade de MSRS na safra 2014/2015 (Tabela 21). A formação de palhada é essencial ainda 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 (BORTOLINI, 2005).

A MOS é um dos parâmetros mais indicados e utilizados para a determinação da qualidade do solo (FRANZLUEBBERS, 2002). Assim, a manutenção deste atributo torna-se um fator limitante da produtividade e sustentabilidade das atividades agrícolas mundiais. De acordo com Lopes (1977), os teores de matéria orgânica na maioria dos solos brasileiros (regiões tropicais), situam-se entre 2% e 3%, resultados estes condizentes com os obtidos na presente pesquisa (2,4 a 3,4% - dados não apresentados). Este autor afirma ainda que, os baixos teores de MO nos solos, resultam em baixos conteúdos de nitrogênio, enxofre e boro potencialmente mineralizáveis, podendo influenciar diretamente na produtividade das culturas.

Em pesquisa realizada por Carvalho et al. (2009) na região do Cerrado, indicam que a taxa de acúmulo de C na conversão do sistema de SSD para SIPA sob SSD

pode variar de 800 a 2800 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Tais autores destacam que nesse sistema, o manejo adequado do solo e da vegetação deve ter como premissa básica o mínimo revolvimento do solo, além de rotação de culturas utilizando plantas com alta produção de resíduos vegetais e, ainda, plantas capazes de acumular nutrientes no solo, como as leguminosas. Tal fato demonstra mais uma vez, a importância e eficiência da adoção de sistemas produtivos como os tratados na presente pesquisa, que apesar de demonstrar diminuição dos teores de C ao longo do tempo (Tabela 15) ainda são considerados valores médios segundo Raij (1996) e semelhante aos níveis encontrados antes do início da condução da presente pesquisa, em setembro de 2013 (Quadro 1). Portanto, os SIPA avaliados na presente pesquisa foram eficientes em manter os níveis de C no solo, mesmo com elevada extração de nutrientes decorrente da produção de silagem.

Além da alta extração promovida pela produção de silagem, uma vez que são colhidos e retirados da área, grande parte do material vegetal produzido, deve-se considerar também a extração promovida pelo pastejo dos animais. Esta ação contribui para intensificar a diminuição dos níveis de nutrientes, como o nitrogênio, uma vez que, os teores deste decaíram na camada de 0,0 a 0,05 (Tabela 15).

De acordo com Anghinoni (2007), a principal relação existente entre a fertilidade do solo e a disponibilidade de nitrogênio refere-se ao aumento nos teores de matéria orgânica do solo. Entretanto, conforme pesquisas conduzidas por Barducci et al. (2009) e Costa et al. (2015a), em SIPA sob SSD, a utilização de fertilizantes nitrogenados nas forrageiras, após a colheita da cultura produtora de grãos, pode incrementar a disponibilidade do elemento ao sistema, proporcionando ainda maior produtividade de forragem e resíduos vegetais no sistema.

Os SIPA, de modo geral, são considerados de extrema complexidade, em razão da magnitude das transformações do N no solo decorrente dos processos de mineralização/imobilização, uma vez que é composto por diferentes culturas em consórcio em sistema de rotação, além do período de pastejo na entressafra (MARTHA JÚNIOR; VILELA, 2007; ANGHINONI, 2007; COSTA et al., 2015a).

Apesar de benefícios do efeito residual da adubação da cultura produtora de grãos, principalmente de P e K, o N apresenta-se em grande parte imobilizado na palhada nos primeiros 5-10 anos de SSD (ANGHINONI, 2007), podendo este efeito, ser o motivo principal do menor teor de N ao longo do tempo na presente pesquisa, podendo tornar-se limitante para o desenvolvimento das culturas, em curtos

períodos de tempo como avaliados neste trabalho (2 anos de avaliação). Portanto, são necessários estudos mais prolongados para se obter resultados mais abrangentes sobre a dinâmica do N nos sistemas avaliados a longo prazo.

Assim, pode-se considerar que os sistemas conservacionistas podem melhorar as condições físicas, químicas e biológicas 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 efeito residual das adubações nas culturas e a intensificação da utilização da área agrícola (FONTANELI et al., 2000; SANTOS et al., 2011; SPERA et al., 2010a; CHIODEROLI et al., 2012; MENDONÇA et al., 2012; COSTA et al., 2014; 2015a; PARIZ et al., 2017a).

Portanto, torna-se necessária a adoção de práticas conservacionistas de manejo do solo e das culturas como as praticadas na presente pesquisa (SIPA sob SPD), tendo em vista principalmente, melhorá-lo química, física e biologicamente, principalmente quanto ao teor de matéria orgânica, criando condições favoráveis ao desenvolvimento agrícola durante os cultivos.

### **4.3 Raiz**

Na Tabela 16 estão apresentados os resultados para comprimento de raiz (CR) aos 6 e 24 meses. Durante o 6º mês de avaliação houve influência dos sistemas de produção no CR nas camadas de 0,0 a 0,05 e de 0,1 a 0,2 m. Em ambas as camadas de solo amostradas no sistema MB+ALI, ocorreram maiores valores de CR, provavelmente devido ao ambiente mais restritivo quanto à retenção de água no solo encontradas neste sistema. Pode ser que o menor conteúdo de água no solo (Figura 2) e MA (Tabela 4) para MB+ALI durante o 6º mês, tenha levado à maior produção de raízes, pela necessidade das plantas em buscar recurso hídrico refletindo em condições adversas, resultando em maior comprimento total do sistema radicular.

O maior comprimento total de raízes em MB+ALI durante o 6º mês para as camadas de 0,0 a 0,2 m (Tabela 16), pode estar associado a menor competição entre as culturas devido a ausência do feijão-guandu, possibilitando maior quantidade de raízes, uma vez que, o comprimento total de raízes é obtido pelo

somatário total de fragmentos de raízes, podendo ser portanto, melhor correlacionado com a quantidade de raízes presentes no solo.

Tabela 16. Efeito dos sistemas de produção no comprimento de raiz (cm dm<sup>-3</sup>) para as camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2 e 0,2 - 0,4 m aos 6 e 24 meses de avaliação.

Sistema de produção	Época (meses)	
	6	24
<i>Camada 0,0 – 0,05 m</i>		
MB+ALA	471 ab	74
MB+ALI	576 a	135
MBG+ALA	325 b	227
MBG+ALI	328 b	124
Valor <i>p</i>	0,019	0,074
<i>Camada 0,05 – 0,1 m</i>		
MB+ALA	284	446 a
MB+ALI	359	378 b
MBG+ALA	458	128 d
MBG+ALI	368	200 c
Valor <i>p</i>	0,214	<0,001
<i>Camada 0,1 – 0,2 m</i>		
MB+ALA	32 c	19 b
MB+ALI	81 a	27 a
MBG+ALA	48 bc	10 c
MBG+ALI	67 ab	15 bc
Valor <i>p</i>	0,002	0,005
<i>Camada 0,2 – 0,4 m</i>		
MB+ALA	4,91	3,48 b
MB+ALI	6,96	5,44 a
MBG+ALA	8,04	1,52 c
MBG+ALI	7,53	3,21 b
Valor <i>p</i>	0,154	<0,001

Médias seguidas de uma mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ).

Nas camadas abaixo de 0,1 m durante o 24<sup>o</sup> mês foi constatado o menor comprimento de raiz no sistema MBG+ALA (Tabela 16). Pode ser que as melhores condições quanto à retenção de água no solo (Figura 3) associada a alta disponibilidade de nutrientes como o Ca, Mg, P e K nas camadas que vão até 0,1 m de profundidade (Tabela 14 e Tabela 15) possa ter favorecido o menor crescimento de raízes no solo, pela menor necessidade de produção radicular para compensar a busca por condições mais favoráveis quanto à porosidade, disponibilidade hídrica e fertilidade do solo. Além disso, o período de cultivo do segundo ciclo experimental

(novembro de 2014 a novembro de 2015) apresentou considerável abundância de chuva, praticamente o dobro em relação ao mesmo período de 2013 a 2014. O crescimento das raízes em profundidade em direção ao solo úmido, segundo Taiz; Zeiger (2004), pode ser considerado uma defesa contra a seca. Em pesquisa realizada por Price et al. (2002) avaliando-se o desenvolvimento radicular de plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) expostas a contrastes de regimes de déficit de água, citam que o aumento do comprimento das raízes de arroz foi maior como resposta ao déficit hídrico.

No entanto, são necessário estudos mais duradouros, para avaliar precisamente qual a relação entre o comprimento de raiz em relação a qualidade do ambiente rizosférico, principalmente quanto a disponibilidade de água e nutrientes no solo em SIPA.

Na camada de 0,0 a 0,05 m no 6º mês de avaliação, os sistemas MB+ALI e MBG+ALI proporcionaram o desenvolvimento de raízes com maior diâmetro médio (Tabela 17), que pode estar associado ao ambiente mais restritivo quanto a MA e PT do solo, verificado sob esses sistemas, provocando o engrossamento de raízes. Foi observado que no 6º mês, houve redução significativa da MA (Tabela 4) para a camada de 0,0 a 0,05 m, sob os sistemas MB+ALI e MBG+ALI, resultado atribuído a ausência de revolvimento superficial do solo, por conta da incorporação das sementes de aveia a lanço, que também pode ter favorecido o aumento do diâmetro médio de raízes nessa camada (Tabela 17). Benghough; Benghough; Mullins (1990) afirmam que o menor crescimento radicular em solos compactados ocorre por causa da menor taxa de alongação celular em razão da diminuição na taxa de divisão celular do meristema.

À medida que a densidade aparente do solo aumenta e a porosidade total diminui, a resistência do solo à penetração da raiz aumenta, causando um impedimento ao crescimento da raiz e restringindo o movimento da água e do ar ao longo do perfil (CHEN et al., 2014), resultando em uma aeração deficiente para o sistema de raízes (MARSCHNER, 1995). Quando as raízes crescem encontrando uma camada de alta resistência no perfil do solo, elas proliferam na camada superior, que é rapidamente esgotada em água e nutrientes (SOANE; VAN OUWERKERK, 1995), podendo resultar em perda de rendimento das culturas (CALONEGO; ROSOLEM, 2010; CALONEGO et al., 2017).

Tabela 17. Efeito dos sistemas de produção no diâmetro médio de raiz (mm) para as camadas do solo de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2 e 0,2 - 0,4 m aos 6 e 24 meses de avaliação.

Sistema de produção	Época (meses)	
	6	24
<i>Camada 0,0 – 0,05 m</i>		
MB+ALA	0,59 c	0,24
MB+ALI	0,80 a	0,31
MBG+ALA	0,69 b	0,25
MBG+ALI	0,80 a	0,26
Valor <i>p</i>	<0,001	0,158
<i>Camada 0,05 – 0,1 m</i>		
MB+ALA	0,71 b	0,22 b
MB+ALI	0,90 a	0,29 a
MBG+ALA	0,84 a	0,27 a
MBG+ALI	0,86 a	0,25 a
Valor <i>p</i>	0,002	0,025
<i>Camada 0,1 – 0,2 m</i>		
MB+ALA	0,40 b	0,32 a
MB+ALI	0,50 a	0,23 b
MBG+ALA	0,46 a	0,27 b
MBG+ALI	0,48 a	0,25 b
Valor <i>p</i>	0,003	0,008
<i>Camada 0,2 – 0,4 m</i>		
MB+ALA	0,19 b	0,23
MB+ALI	0,27 a	0,29
MBG+ALA	0,23 a	0,28
MBG+ALI	0,24 a	0,25
Valor <i>p</i>	0,015	0,076

Médias seguidas de uma mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ).

Nas camadas do solo que vão de 0,0 a 0,4 m no 6º mês, e na camada de 0,05 a 0,2 m no 24º mês, houve menor diâmetro médio de raízes no sistema MB+ALA (Tabela 17). O menor diâmetro de raízes neste sistema pode ser devido a ausência do feijão-guandu e presença do revolvimento superficial do solo.

A ausência das raízes de maior diâmetro, característico do sistema radicular pivotante da leguminosa, além do aumento da MA do solo nas camadas de 0,0 a 0,1 m no 6º mês (Tabela 4) no sistema MB+ALA, pode ter proporcionado condições mais favoráveis ao desenvolvimento de raízes mais finas em maiores profundidades. Além disso, pode-se perceber que nas camadas de 0,1 a 0,4 m, houve menor teor de cálcio no solo para o sistema MB+ALA (Tabela 14), o que pode ter influenciado no desenvolvimento de raízes mais finas, uma vez que os efeitos benéficos do

cálcio, de maneira geral, estão linearmente relacionados com o desenvolvimento radicular das plantas (RITCHEY et al., 1982).

Além disso, sabe-se que o Ca apresenta correlação direta com aumento do pH do solo e também com a atividade do  $Al^{+3}$ . Em pesquisa realizada por Silva et al. (2004) avaliando-se o desenvolvimento de raízes de cultivares de feijão em resposta a calagem, concluíram que em condições de elevada acidez do solo, há redução do diâmetro radicular à custa do crescimento em comprimento. No entanto, segundo Malavolta (2006) os sintomas de toxidez por  $Al^{+3}$  se manifestam em primeiro lugar nas raízes, nas quais há redução no crescimento do eixo principal, do que resultam raízes curtas e mais grossas, coralóides, com inibição da formação das laterais. O incremento do teor de Ca, em profundidade, aumenta a relação Ca:Al, o que resulta numa melhoria do ambiente radicular pela diminuição da atividade do alumínio (BIASSANI et al., 2008).

Nota-se que na presença do feijão-guandu em SIPA, há também um aumento do diâmetro médio de raízes nas camadas de 0,0 a 0,4 durante o 6º mês (Tabela 17), provavelmente pelo fato das raízes da leguminosa naturalmente serem mais grossas em comparação às das gramíneas. Este resultado também demonstra o alto potencial de desenvolvimento em profundidade das raízes do feijão-guandu, pela presença de raízes de maior diâmetro até 0,4 m de profundidade.

Ainda é possível constatar que entre os sistemas de consorciação dupla (MB+ALA e MB+ALI), o aumento do diâmetro médio de raiz em MB+ALI, provavelmente é condicionado pela ausência da gradagem niveladora para incorporação das sementes da aveia, favorecendo ao aumento do diâmetro médio de raízes principalmente entre as camadas de 0,05 a 0,2 m (Tabela 17). Além disso tal fato, possivelmente está associado ao ambiente menos favorável quanto a PT e MA do solo sob MB+ALI, corroborando com Marschner (1995) e Chen et al. (2014), ao afirmarem que o ambiente mais restritivo quanto a física do solo limitam o crescimento radicular das plantas.

## 4.4 Produção vegetal

### 4.4.1 Produtividade de massa seca das culturas produzidas para ensilagem nos períodos de safra

De maneira geral, verificou-se diferença significativa em função dos tratamentos e anos agrícolas (épocas), para massa seca residual total da silagem (MSRS), que corresponde aos resíduos das culturas do milho, capim-marandu e feijão-guandu após a colheita do material vegetal para ensilagem, e para massa seca residual do capim-marandu (MSRB) (Tabela 18). Houve efeito da interação significativa (tratamento $\times$ época) apenas para a produtividade de grãos do milho (PG).

Tabela 18. Valores *p* do teste de F das variáveis massa seca de silagem (MSS), produtividade de grãos que compõem a silagem (PG), massa seca residual do milho (MSRM), massa seca residual do feijão-guandu (MSRG), massa seca residual do capim-marandu (MSRB) e massa seca residual total da silagem (MSRS) nos anos agrícolas de 2013/2014 e 2014/2015.

Fonte de variação	MSS <sup>§</sup>	PG	MSRM <sup>†</sup>	MSRG <sup>†</sup>	MSRB <sup>†</sup>	MSRS <sup>†</sup>
Trat. (A)	0,054	0,001	0,195	0,059	0,455	<0,001
Ano agrícola (B)	0,020	0,353	0,065	0,777	<0,001	<0,001
A x B	0,006	<0,001	0,183	0,511	0,377	0,059

<sup>§</sup>Material coletado da parte aérea das plantas acima de 0,45 m; <sup>†</sup>Material coletado da base da planta até 0,45 m de altura.

Na Tabela 19 estão apresentados as médias de produtividade de massa seca de silagem (MSS) para os anos agrícolas de 2013/2014 e 2014/2015. Houve maior produtividade de MSS na safra 2013/2014 nos sistemas que tiveram a presença do feijão-guandu, demonstrando que a inclusão da leguminosa no sistema produtivo pode ser uma ferramenta importante para incrementar a produtividade de silagem, principalmente em períodos de baixa disponibilidade hídrica, como ocorrido na safra 2013/2014 na presente pesquisa (Figura 1).

Uma das alternativas mais utilizadas pelos pecuaristas para suprir a necessidade de forragens na época seca do ano (entressafra), tem sido o uso de plantas conservadas na forma de silagem. Assim, para produzir silagem, faz-se necessário a utilização de espécies vegetais com elevada produção de massa seca e alta qualidade bromatológica e nutricional (PIMENTEL et al., 1998; JAREMTCHUK

et al., 2005; PAZIANI et al., 2009). Desta forma, o milho é uma das espécies vegetais mais utilizadas para a produção de silagem (PIRES et al., 2009; COSTA et al., 2017), devido à facilidade de cultivo, alta produtividade, colheita mecânica facilitada, bons padrões de fermentação da silagem, além de não haver necessidade de aplicação de aditivos para estimular a fermentação (ZAGO, 1991; SILVA et al., 1999; ZAGO, 2002; PEREIRA et al., 2004).

Tabela 19. Desdobramento das interações significativas para a produtividade de massa seca de silagem (MSS) nos sistemas integrados de produção agropecuários durante as safras 2013/2014 e 2014/2015.

Sistema de produção	Ano agrícola	
	2013/2014	2014/2015
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----	
MB+ALA	12826 cB	14854 abA
MB+ALI	14085 bcB	16363 aA
MBG+ALA	15821 aA	14281 bA
MBG+ALI	14632 abA	15639 abA

Médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas na coluna comparam os tratamentos e letras maiúsculas nas linhas comparam as safras.

O uso do consórcio de culturas é um dos meios para se elevar a produtividade de sistemas de produção integrados (CRUSCIOL et al., 2015; MATEUS et al., 2016; COSTA et al., 2012; 2016; 2017). Também é possível reduzir o custo da formação de pastagens e ofertar alimento para o gado no período de entressafra (PARIZ et al., 2017a, b, c). Além da produção de silagem utilizando somente a cultura do milho, tem-se utilizado também a combinação dessa cultura com forrageiras tropicais em sistemas consorciados, a fim de aumentar a produção de matéria seca por área e proporcionar a formação de pastagem após o processo de ensilagem (LEONEL et al., 2008, LEONEL et al., 2009; COSTA et al., 2017). Entretanto, pesquisas envolvendo o consórcio triplo entre milho x capim-marandux feijão-guandu com esta finalidade, ainda são escassos.

Na safra 2014/2015, houve redução na produtividade de MSS no sistema MBG+ALA, que pode estar relacionado com a diminuição dos teores de nitrogênio na camada de 0,0 a 0,05 m (Tabela 15). Foi possível constatar também que os teores de nitrogênio e cálcio foram menores durante o 18<sup>o</sup> e 24<sup>o</sup> mês (Tabela 14 e Tabela 15), portanto, a redução desses nutrientes pode ter influenciado negativamente a produção da silagem na safra 2014/2015.

De modo geral, pode-se considerar que os valores obtidos para produção de silagem foram satisfatórios para a região em estudo. Em pesquisa realizada por Costa et al. (2017), avaliando a produtividade de massa seca de silagem de milho em consórcio com o capim-marandu e capim-tanzânia sob sistema irrigado em região de cerrado, os autores obtiveram valores médios de 26,9 e 39,0 t ha<sup>-1</sup>, para os anos agrícolas 2010/2011 e 2011/2012, respectivamente. Jaremtchuk et al. (2005) avaliaram vinte genótipos de milho, obtendo produtividade média de 16,2 a 26,5 t ha<sup>-1</sup>. Paziani et al. (2009) avaliando de 15 a 24 cultivares de milho em quatro regiões do país, obtiveram produtividades de massa seca entre 14,3 a 25,1 t ha<sup>-1</sup>.

Deve-se salientar que mesmo obtendo-se menores valores de MMS nos SIPA avaliados na presente pesquisa, quando comparados aos valores obtidos na literatura, tem-se o benefício da pastagem implantada na entressafra que pode servir como alimento volumoso aos animais após a colheita do material para ensilagem, ou até mesmo servir como palhada para manutenção e continuidade do SSD, trazendo inúmeros benefícios para os sistemas de cultivo.

Pode-se considerar que a cultura do milho destinada a ensilagem apresentou boa produtividade, independentemente do tipo de consórcio utilizado (Tabela 20). Tal fato é de extrema relevância, uma vez que a alta produção de massa seca de forragem pode diluir os custos necessários para a confecção da silagem (COSTA et al., 2015b). Tais resultados demonstram que é possível o consórcio neste sistema de produção visando a produção de silagem, principalmente no consórcio triplo, uma vez que a inclusão do feijão-guandu pode ainda melhorar a qualidade nutricional da silagem (COSTA et al., 2015b).

Tabela 20. Desdobramento das interações significativas para a produtividade de grãos de milho (PG) que compõem a silagem nos sistemas integrados de produção agropecuários durante as safras 2013/2014 e 2014/2015.

Sistema de produção	Ano agrícola	
	2013/2014	2014/2015
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----	
MB+ALA	6557 bB	7236 bA
MB+ALI	7320 aB	8411 aA
MBG+ALA	7509 aA	6630 bB
MBG+ALI	7480 aA	7186 bA

Médias seguidas de uma mesma letra não diferem entre si pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ). Letras minúsculas na coluna comparam os tratamentos e letras maiúsculas nas linhas comparam as safras.

Em sistemas integrados de produção mal manejados, pode ocorrer a redução da produtividade da cultura produtora de grãos, principalmente pelo aumento da competição entre as espécies utilizadas em consórcio, tanto por água, luz e nutrientes. Sabe-se também que sob condições climáticas extremas, como as verificadas no presente trabalho para a safra 2013/2014, em sistemas que preconizam a inclusão de espécies com alta produção de massa seca como o capim-marandu e feijão-guandu, pode ocorrer diminuição das perdas de água, principalmente devido à maior cobertura vegetal fornecida pelo sistema, que garante menor amplitude térmica na superfície do solo e conseqüentemente menor evaporação.

Provavelmente as plantas de milho consorciadas com feijão-guandu e capim-marandu foram menos prejudicadas devido à maior cobertura do solo, principalmente quando se obteve condições climáticas extremas, podendo-se citar o regime hídrico na safra 2013/2014 (Figura 1). Além disso, a melhoria principalmente na qualidade física do solo no sistema com adoção do consórcio triplo, pode ter favorecido o desenvolvimento das plantas, tornando-as menos suscetíveis às adversidades climáticas durante seu ciclo produtivo.

A redução na PG sob sistema MB+ALA na safra 2013/2014 (Tabela 20), também pode estar relacionado à maior exposição desse sistema às condições climáticas extremas, como o déficit hídrico, verificado na safra 2013/2014. O acumulado de chuvas entre outubro de 2013 e março de 2014 resultou em um total de 511 mm, ou seja, 45% da média histórica de 1123 mm (outubro a março) para a região. Entretanto, no mesmo período de 2014 e 2015, o acumulado de chuvas foi de 1219 mm, o que corresponde a cerca de 108% da média histórica (Figura 1).

As menores quantidades de MSRS (Tabela 21) e MSV em novembro de 2014 (Tabela 22) ocorreram sob o sistema MB+ALA. Estes fatores em associação às operações de gradagem niveladora, podem ter favorecido maiores perdas de água, promovida pela maior exposição do solo através do revolvimento superficial e menor proteção do mesmo pela baixa quantidade de material vegetal aportado ao sistema. Além disso, deve-se considerar que as condições menos favoráveis à retenção de água no solo se deram no período de safra, principalmente nas avaliações realizadas no 6º mês após o início de condução do experimento (Figura 2).

No entanto, pode-se perceber que o sistema MB+ALI apresentou a maior PG na safra 2014/2015 (Tabela 20), o que contribuiu para aumentar significativamente a

produtividade de MSS (Tabela 19). O aumento da produtividade sob sistema MB+ALI pode estar relacionado com a melhor disponibilidade hídrica no período de cultivo da safra 2014/2015 (Figura 1) e provavelmente menor competição entre plantas, uma vez que neste tipo de consórcio não há presença do feijão-guandu.

Esses resultados demonstram que o uso da consorciação tripla (milho×capim-marandu×feijão-guandu) é uma ferramenta muito importante para o aumento da produtividade de silagem sem impactar negativamente na produtividade de grãos de milho em períodos de menor disponibilidade hídrica, como o ocorrido entre os meses de outubro de 2013 a março de 2014. No entanto, quando as condições hídricas são normais, o uso da consorciação tripla pode promover maior competição com o milho, reduzindo significativamente a produtividade de grãos de milho e produção de massa seca da silagem.

Neste sentido, torna-se necessário a realização de mais pesquisas, em diferentes regiões e por maior período de tempo, a fim de melhor validar essa tecnologia. Ainda não se sabe ao certo qual o melhor espaçamento, densidade populacional, profundidade de semeadura, dose de fertilizantes a serem utilizados, além das espécies vegetais mais adaptadas a este tipo de consórcio.

Foi possível constatar-se ainda, que o uso de operações de revolvimento superficial, para incorporação das sementes de aveia com consorciação dupla (milho×capim-marandu), interferem negativamente na produtividade de grãos de milho (Tabela 20). No entanto, não se verificou influência negativa deste sistema para a produção de silagem em condições de alta disponibilidade hídrica.

Na Tabela 21 estão apresentados os valores de massa seca dos resíduos de colmos de milho (MSRM), capim-marandu (MSRB), feijão-guandu (MSRG) e total da silagem (MSRS) no momento de colheita das plantas para ensilagem. Não houve efeito significativo da interação entre sistemas de produção e anos agrícolas.

Foi observado maior valor de MSRS nos sistemas MBG+ALA e MBG+ALI, provavelmente devido a presença do feijão-guandu na consorciação tripla. Tal fato demonstra que o uso desta leguminosa é uma boa opção para incrementar, não só a produtividade de silagem, mas também para garantir maior quantidade de cobertura para o solo a fim de manter o SSD e ciclagem de nutrientes.

Tabela 21. Massa seca residual de colmos de milho (MSRM), do feijão-guandu (MSRG), do capim-marandu (MSRB) e total (MSRS) nos sistemas integrados de produção agropecuários e durante as safras 2013/2014 e 2014/2015.

Sistema de produção	MSRM	MSRG	MSRB	MSRS
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----			
MB+ALA	1883	-	197	2079 b
MB+ALI	2066	-	139	2205 b
MBG+ALA	2001	791	199	2991 a
MBG+ALI	2206	466	185	2856 a
2013/2014	2139	316	275 a	2730 a
2014/2015	1939	312	86 b	2336 b

Médias seguidas de uma mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste t LSD ( $p \leq 0,05$ ).

Na safra 2014/2015, houve redução da MSRS provavelmente devido à menor quantidade de resíduos do milho (MSRM) e também do capim-marandu (MSRB) (Tabela 21). Houve redução significativa na quantidade residual de matéria seca do capim-marandu durante a safra 2014/2015 que contribuiu para a redução dos resíduos deixados no sistema após a colheita da silagem (MSRS). A diminuição significativa das quantidades de matéria seca do capim-marandu, ocorreu provavelmente devido a baixa emergência da forrageira durante a safra 2014/2015, onde visualmente foi possível constatar que havia pouco material após a colheita da silagem, devido a sementeira profunda do capim-marandu.

Cabe ressaltar-se que a prática da elevação na altura de corte das plantas para ensilagem, como a praticada no presente estudo, pode diminuir a exportação de nutrientes do solo, retornando quantidades consideráveis de nutrientes ao sistema, através dos processos de decomposição e mineralização do material vegetal, beneficiando os sistemas produtivos, uma vez que são deixadas maiores quantidades de resíduos sob a superfície do solo.

A maior quantidade MSRS após a colheita do material vegetal para ensilagem na safra 2013/2014, é provavelmente decorrente da maior quantidade de resíduos de colmo do milho. Apesar de não haver diferença significativa para MSRM, percebe-se que houve uma redução dos valores na safra 2014/2015 (Tabela 21).

De acordo com Kluthcouski et al. (2000), o sombreamento proporcionado no consórcio com culturas produtoras de grãos, pode fazer também com que as forrageiras diminuam sua taxa de acúmulo de massa seca. Estes mesmos autores verificaram que a partir da senescência da cultura granífera, o crescimento do capim

torna-se rápido, podendo atingir 2000 kg ha<sup>-1</sup> de massa seca com a aplicação de N em cobertura 30 dias após a colheita da cultura anual.

Em sistemas consorciados em que ocorre menor estímulo luminoso, a planta converte seus carboidratos de reserva para o meristema apical, estimulando o alongamento de entrenó, na tentativa de buscar luz até um ponto crítico, onde a planta paralisa seu crescimento, diminuindo o aparecimento de novos perfilhos (PORTES et al., 2000).

Em pesquisa realizada por Sereia et al. (2012), os autores avaliaram o desenvolvimento de *Urochloa* spp. (syn. *Brachiaria*) em sistema de consórcio com o milho safrinha na região de Dourados/MS e verificaram que a partir do momento em que o milho entra em estágio de maturação fisiológica, há retomada da emissão de novos perfilhos pelas braquiárias, devido ao estímulo luminoso que chega até as plantas, podendo apresentar desenvolvimento expressivo após a colheita do milho, chegando a multiplicar de 2,2 a 2,7 vezes sua produção de massa seca.

De acordo com Borghi e Crusciol (2007), pode haver competição dos capins quando cultivados simultaneamente à cultura do milho (BORGHI; CRUSCIOL, 2007). Ao longo do período de desenvolvimento dos capins em consórcio com a cultura do milho, estes apresentam folhas mais compridas e alongamento dos perfilhos, em função das plantas crescerem em busca de luz, tendo em vista que no consórcio ocorre a ausência parcial de luminosidade durante grande parte do desenvolvimento dos capins. O estiolamento ocorre pela síntese de auxinas que fazem com que o caule e as folhas cresçam excessivamente para que a planta atinja alturas favoráveis à obtenção de luz.

Entretanto, atualmente sabe-se que, se o consórcio for bem manejado, principalmente com relação à implantação adequada das culturas, assim como correto manejo da adubação, essa competição é mínima (COSTA et al., 2016; 2017; CRUSCIOL et al., 2015; MATEUS et al., 2016; PARIZ et al., 2017a, b)

Em sistemas de produção de silagem, a altura de colheita das plantas para ensilagem é fator de extrema relevância, uma vez que o aumento na altura de corte pode ser uma excelente alternativa para aumentar-se a qualidade energética da silagem, assim como diminuir os teores de fibras na composição final do material ensilado.

Na presente pesquisa, a altura de corte adotada, foi de aproximadamente 0,45 m em relação à superfície do solo. Assim, com alturas de corte mais elevadas, haverá

uma redução na relação colmo/espiga, fazendo com que haja uma melhoria nas características nutricionais do alimento (PARIZ et al., 2017). Além disso, o aumento na altura de corte pode favorecer ainda as características físico-químicas do solo, pois haverá maior residual de material vegetal na área, o que pode favorecer a ciclagem de nutrientes (COSTA et al., 2015a). Nas condições da presente pesquisa o manejo da altura de colheita da silagem, do material a ser ensilado pode favorecer ao aumento de nutrientes como Ca, Mg, N e C ao longo do tempo. No entanto, maior tempo de pesquisa se faz necessário para verificar quais são as influências da altura de colheita de silagem em SIPA, na física e fertilidade do solo.

#### 4.4.2 Produção de massa seca vegetal nos períodos de entressafra

De modo geral, houve efeito significativo dos sistemas de produção para a produtividade de massa seca vegetal (MSV) apenas em novembro de 2014, onde a menor produtividade ocorreu nos sistemas MB+ALI e MB+ALA (Tabela 22). Este comportamento já era esperado, uma vez que a ausência do feijão-guandu, diminuiu a quantidade de MSRS (Tabela 21) refletindo, portanto, na diminuição da quantidade de cobertura do solo para os sistemas MB+ALI e MB+ALA em novembro de 2014 (Tabela 22).

Tabela 22. Efeito dos sistemas de produção na produtividade de massa seca vegetal (MSV) nos períodos de entressafra de 2014 e 2015.

Sistema de produção	2014		2015	
	Junho	Novembro	Junho	Novembro
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----			
MB+ALA	3394 <sup>§</sup>	4585 <sup>†bc</sup>	4524 <sup>§</sup>	3607 <sup>†</sup>
MB+ALI	2688	3834 c	3848	3037
MBG+ALA	3582	6715 a	4828	2896
MBG+ALI	3689	6145 ab	3940	2694
Valor de p	0,256	0,008	0,460	0,445

<sup>§</sup>Aveia+capim-marandu+palha; <sup>†</sup>capim-marandu+palha. Médias seguidas de uma mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste t LSD (p≤0,05).

A produtividade vegetal no período de entressafra em SIPA é fator de extrema relevância nos sistemas de produção atuais, que visam maximizar a utilização da área agrícola durante todo o ano, considerando-se também a obtenção de maior conservação do solo. A forragem produzida após a colheita para ensilagem serve

como alimento para os animais durante o período de pastejo e também como palhada para manutenção e continuidade do SSD.

Assim, a produção vegetal durante praticamente todo o ano agrícola, proporciona maior diversidade no sistema de produção, além de proteger o solo contra a ação de agentes erosivos, favorecendo a qualidade do solo e ciclagem de nutrientes.

Os sistemas de produção avaliados na presente pesquisa visando a produção de silagem, mesmo com alta exportação de nutrientes, tráfego de máquinas e pastejo por cordeiros, foram eficientes em atenuar os efeitos negativos na qualidade física do solo. Também foram eficientes em proporcionar condições de melhorias no ambiente físico-hídrico do solo, principalmente quando adotada a consorciação tripla em SIPA sob SSD. De modo geral, SIPA aliado ao SSD tem demonstrado maior eficiência em preservar os recursos naturais e explorar racionalmente os solos (KLUTHCOUSKI et al., 2007; COSTA et al., 2015a; PARIZ et al., 2017a). O sucesso desses sistemas produtivos, deve-se ao fato de que a palhada acumulada pelas plantas de cobertura, pastagens e restos culturais de lavouras proporciona um ambiente favorável à recuperação ou manutenção dos atributos físicos do solo.

A quantidade de palhada produzida nos sistemas avaliados (novembro de 2014 e 2015, respectivamente) podem ser considerados satisfatórios para a manutenção dos atributos físicos do solo sob SSD para a região em estudo. Ruedell (1998) sugeriu uma adição anual em torno de 6000 kg ha<sup>-1</sup> de massa seca, enquanto Bayer et al. (2000) sugeriram uma adição anual em torno de 10000 a 12000 kg ha<sup>-1</sup> de massa seca, ambos na região Sul do Brasil.

Cabe ressaltar-se que os resíduos culturais que permanecem na superfície do solo constituem importante reserva de nutrientes, cuja disponibilização pode ser rápida e intensa (ROSOLEM; CALONEGO; FOLONI, 2003; PARIZ et al., 2011), ou lenta e gradual, conforme a interação entre os fatores climáticos, principalmente precipitação pluvial e temperatura, atividade macro e microbiológica do solo e qualidade e quantidade do resíduo vegetal (ALCÂNTARA et al., 2000; COSTA et al., 2014).

Magalhães et al. (2002), avaliando a produtividade de massa seca e a exportação de nutrientes pela parte aérea da *U. brizantha* implantada no sistema Barreirão, verificaram valores médios de 46,2 a 87,2 kg ha<sup>-1</sup> de N; 7,7 a 18,6 kg ha<sup>-1</sup> de P; 96,9 a 196,1 kg ha<sup>-1</sup> de K; 9,9 a 17,1 kg ha<sup>-1</sup> de Ca e de 9,0 a 19,6 kg ha<sup>-1</sup> de

Mg. Desta forma, fica evidente mais uma vez a importância do manejo adequado dos sistemas produtivos em SIPA sob SSD, visando fornecer nutrientes ao sistema, para minimizar a degradação do solo e resultar em produtividades satisfatórias das culturas ao longo dos cultivos.

De acordo com Vitti et al. (2008), os SIPA são indicados por proporcionar palhada para o SSD e forragem na entressafra para os animais. Portanto, a adoção destas práticas de manejo, assim como as efetuadas no presente estudo, pode proporcionar inúmeros benefícios aos sistemas produtivos, como os verificados através desta pesquisa, promovendo maior sustentabilidade no setor agropecuário e minimizando possíveis impactos ambientais.

## 5 CONCLUSÕES

A sobresseadura de aveia a lanço com uso de gradagem niveladora para incorporação das sementes, após produção de silagem sob SIPA em SSD, proporciona melhorias nas propriedades físico-hídricas do solo dentro de dois anos. Em contrapartida, as operações mecanizadas diminuem a agregação do solo.

O uso de feijão-guandu em cultivo consorciado com capim-marandu e milho para silagem sob SSD é um eficiente agente descompactador natural do solo e melhora os atributos físicos sem a necessidade de operações mecanizadas.

Menores quantidades de resíduos da colheita das plantas para a ensilagem diminuem a concentração de alguns nutrientes no solo, como o Ca, Mg, N e C, no entanto, sem atingir níveis críticos aos SIPA.

O consórcio triplo milhoxcapim-maranduxfeijão-guandu é uma ferramenta estratégica e eficiente para aumentar a produtividade de silagem e de resíduos vegetais (palhada) no solo mesmo em período de baixa disponibilidade hídrica em SIPA sob SSD.

## REFERÊNCIAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 519-531, 2004.

ADAMI, P.F.; PITTA, C.S.R. **Pastagem e bovinocultura de leite**. Curitiba: Instituto Federal do Paraná, 80 p., 2012.

AGNES, E. L.; FREITAS, F. C. L.; FERREIRA, L. R. Situação atual da integração agricultura pecuária em Minas Gerais e na Zona da Mata Mineira. In: ZAMBOLIM, L.; FERREIRA, A. A.; AGNES, E. L. **Manejo integrado: integração agricultura-pecuária**. Viçosa: Ed. UFV, 2004. p. 251-267.

ALCÂNTARA, F. A. DE; FURTINI NETO, A. E.; PAULA, M. B DE; MESQUITA, H. A. DE; MUNIZ, J. A. Green manuring in the recovery of the fertility of an Oxisol dark red degraded. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 2, p. 277-288, 2000.

ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; JANTALIA, C. P.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Emprego de isótopos estáveis para o estudo do carbono e nitrogênio no sistema solo-planta. In: AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. (Org.). **Processos biológicos no sistema solo-planta: Ferramentas para uma agricultura sustentável**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. v.1, p.343-368.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SERNTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J. Acidity and Aluminum Speciation as Affected by Surface Liming in Tropical No-Till Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison. V. 74, p. 1010-1017, 2010.

AMBROSI, I.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; ZOLDAN, S. M. Lucratividade e risco de sistemas de produção de grãos combinados com pastagens de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 10, p. 1213-1219, 2001.

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 382-388, 2009.

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R. F.; V. ALVARES, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 873-928.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; INOUE, T. T.; COSTA, A.C. S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico após treze anos de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.495-504, 2004.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistema de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 7, p. 849-856, 2003.

ASSMANN, A. L.; PELISSARI, A.; MORAES, A. Produção de gado de corte e acúmulo de matéria seca em sistema de integração lavoura-pecuária em presença e ausência de trevo branco e nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 33, n. 1, p 33-47, 2003.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; MORAES, A.; BACKES, R. L. Efeito de coberturas de inverno e sua época de manejo sobre a infestação de plantas daninhas na cultura de milho. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 473-480, 2009.

BALDÉ, A. B.; SCOPELE, E.; AFFHOLDER, F.; CORBEELS, M.; SILVA, F. A. M.; XAVIER, J. H. V.; WERY, J. Agronomic performance of no-tillage relay intercropping with maize under smallholder conditions in Central Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 124, n. 2, p. 240-251, 2011.

BARDUCCI, R. S.; COSTA, C.; CRUSCIOL, C. A. C.; BORGHI, E.; PUTAROV, T. C.; SARTI, L. M. N.; Produção de *Brachiaria brizantha* e *Megathyrsus maximum* com milho e adubação nitrogenada. **Revista Archivos de Zootecnia**, Córdoba, v. 58, n. 222, p. 211-222, 2009.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTINNETO, L.; FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage a cropping systems in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, p.101-109, 2000.

BENGHOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 41, p. 341-358, 1990.

BERG, M. van der; KLAMT, E.; van REEUWIJK; SOMBROEK, W. G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.78, p.161-180, 1997.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PERREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração, permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na Região dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 167-177, 2001.

BIASSANI, C.; MEURER, E. J.; BOHNEN, H. Solos ácidos e solos afetados por sais. In: MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 3. ed. Porto Alegre: Genesis, 2008. p. 163-183.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 12.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 881p.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 605-614, 2006.

BRITO, M. M. P.; MURAOKA, T.; SILVA, E. Contribuição da fixação biológica de nitrogênio, fertilizante nitrogenado e nitrogênio do solo no desenvolvimento de feijão e caupi. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 1, p. 206-215, 2011.

BONINI, C. S. B.; BONINI NETO, A.; ALVES, M. C.; VAZQUEZ, G. H.; COSTA, N. R. **Qualidade física de solo degradado em recuperação**. In: **Tecnologias em agricultura sustentável**. FERNANDO FERRARI PUTTI, ALLA LEON CASEMIRO DA SILVA, LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO. 1ª ed. – Tupã: ANAP, 2017. cap. 1, p. 25-46, 2017.

BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C. Produtividade de milho, espaçamento e modalidade de consorciação com *Brachiaria brizantha* em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p.163- 171, 2007.

BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; SOUZA, V. V.; MARTINS, P.O.; MATEUS, G. P.; COSTA, C. Sorghum grain yield, forage biomass production and revenue as affected by intercropping time. **European Journal of Agronomy**. Amsterdam, v. 51, p. 130–139, 2013.

BORKERT, C. M.; GAUDENCIO, C. A.; PEREIRA, J. E. Nutrientes minerais da biomassa da parte aérea em culturas de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 143-153, 2003.

BORTOLINI, C. G. Rotação de culturas no sistema plantio direto. In: ENCONTRO DE PLANTIO DIRETO NO CERRADO, 8., Tangará da Serra, 2005. **Anais...** Tangará da Serra: Gráfica e Editora Sanches, 2005. p. 115-118.

BUSCHBACHER, R. J. Cattle productivity and nutrient, fluxes on an Amazon pasture. **Biotropica**, Storrs, v. 19, n. 3, p. 200-207, 1987.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; FREDERICK, J. R. Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, p. 49-57, 2002.

CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 27-34, 1998.

CAIRES, E. F.; HALISKI, A.; BINI, A. R.; SCHARR, D. A. Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 66, p. 41-53, 2015.

CALEGARI, A. Rotação de culturas e uso de plantas de cobertura: dificuldades para sua adoção. In: ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO NA PALHA, 2000, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR: 2000. p. 145-152.

CALEGARI, A. Alternativa de rotação de culturas para plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 80, p. 62-70, 2004.

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**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 99-108, 2005.

CALONEGO, J. C. **Uso de plantas de cobertura na recuperação de solo compactado**. 2007. 125 f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Botucatu. 2007.

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**, Amsterdam, n. 33, p. 242-249, 2010.

CALONEGO, J. C.; SANTOS, C. H.; TIRITAN, C. S.; CUNHA JÚNIOR, J. R. Estoques de carbono e propriedades físicas de solos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 2, p. 128-135, 2012.

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

CALVO, C. L.; FOLONI, J. S. S.; BRANCALIÃO, S. R. Produtividade de fitomassa e relação C/N de monocultivos e consórcios de guandu-anão, milho e sorgo em três épocas de corte. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 1, p. 77-86, 2010.

CANTARELLA, H.; VAN RAIJ, B.; CAMARGO, C. E. O. Cereais. In: VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Eds.), **Boletim Técnico 100, Recomendação de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**, ed. 2. Instituto Agrônomo, Campinas, p. 43-71, 1997.

CAMPOS, F. S.; ALVES, M. C. Uso de lodo de esgoto na reestruturação de solo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32: p. 1389-1397, 2008.

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**, São Francisco, n. 11, v. 12, 2016.

CARMEIS FILHO, A. C. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; GUIMARÃES, T. M.; CALONEGO, J. C.; MOONEY, S. J. Correction: Impact of Amendments on the Physical Properties of Soil under Tropical Long-Term No Till Conditions. **Plos One**, São Francisco, n. 12, v. 2, 2017.

CARNEIRO, M. A. C.; CORDEIRO, M. A. S.; ASSIS, P. C. R.; MORAES, E. S.; PEREIRA, H. S.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D. de. Produção de fitomassa de diferentes espécies de cobertura e suas alterações na atividade microbiana de solo de Cerrado. **Bragantia**, Campinas, v. 67, p. 455- 462, 2008.

CARTER, M. R. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 12, p. 37-51, 1988.

CARVALHO, M. A. C.; SORATTO, R. P.; ATHAYDES, M. L. F.; ARF, O.; SÁ, M. E. Produtividade do milho em sucessão a adubos verde no sistema de plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 47-53, 2004.

CARVALHO, P.C.F.; ANGHINONI, I.; MORAES, A.; TREIN, C.; FLORES, J.P.C.; CEPIK, C.C.T.; LEVIEN, R.; LOPES, M.T.; BAGGIO, C.; LANG, C.R; SULC, R.M.; PELISSARI, A. O estado da arte em integração lavoura-pecuária. In: Gottschall, C. S.; Silva, J. L. S. da; Rodrigues, N. C. (Org.). **Produção animal: mitos, pesquisa e adoção de tecnologia**. Canoas, RS, 2005, p. 7-44.

CARVALHO, P. C. F.; MORAES, A.; ANGHINONI, I.; LANG, C. R.; SILVA, J. L. S.; SULC, R. M.; TRACY, B. Manejo da Integração Lavoura Pecuária para a região de clima subtropical. In: Encontro Nacional de Plantio Direto na Palha, 2006, Uberaba - MG. **Anais...** Integrando Agricultura, Pecuária e Meio Ambiente. FEBRAPD, p.177 – 184.

CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; PÍCCOLO, B. C.; GODINHO, V. P.; CERRI, C. C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 342-349, 2009.

CARVALHO, P. C. F.; MORAES, A.; PONTES, L. S.; ANGHINONI, I.; SULC, R. M.; BATELLO, C. Definições e terminologias para Sistema Integrado de Produção Agropecuária. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 45, n. 5, p. 1040-1046, 2014.

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 culturas e métodos de preparo de amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 527-538, 1998.

CASTRO, G. S. A.; CALONEGO, J. C.; CRUSCIOL, C. A. C. Soil physical properties in crop rotation systems as affected by liming materials. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, p. 1690-1698, 2011.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Management impacts on soil organic matter of tropical soils. **Vadose Zone Journal**, Medison, v. 14, n. 1, 2015.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S., GONÇALVES, A. C. A.; COSTA, A. C. S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.137-147, 2006.

CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; LEÃO, T. P.; DEXTER, A. R.; HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 158-164, 2019

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

CHIODEROLI, C. A.; MELLO, L. M. M.; GRIGOLLI, P. J.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, J. O. R.; CESARIN, A. L. Atributos físicos do solo, produtividade de soja em sistema de consórcio milho, braquiária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 16, p. 37-43, 2012.

CHURKA BLUM, S.; CAIRES, E. F.; ALLEONI, L. R. F. Lime and phosphogypsum application and sulfate retention in subtropical soils under no-till system. **Journal of soil science and plant nutrition**, Temuco. v. 13, p. 279-300, 2013.

COSTA, A.; ROSOLEM, C. Liming in the transition to no-till under a wheat–soybean rotation. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 97, p. 207-217, 2007.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; GAMEIRO, R. A.; PARIZ, C. M.; BUZETTI, S.; LOPES, K. S. M. Adubação nitrogenada no consórcio de milho com duas espécies de braquiária em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 47, p. 1038-1047, 2012a.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; GIOIA, M. T.; TARSITANO, M. A. A.; PARIZ, C. M.; BUZETTI, S. Análises técnicas e econômicas no sistema de integração lavoura-

pecuária submetido à adubação nitrogenada. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n.5, p. 597-605, 2012b.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; BUZETTI, S.; LOPES, K. S. M.; SANTOS, F. G.; 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 Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1223-1233, 2014.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; LOPES, K. S. M.; YOKOBATAKE, K. L.; FERREIRA, J. P.; PARIZ, C. M.; BONINI, C. 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**, Viçosa, v. 39, p. 852-863, 2015a.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; BERGAMASCHINE, A. F.; LOPES, K. S. M.; LIMA, A. E. S. Custo da produção de silagens em sistemas de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 62, p. 009-019, 2015b.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; ULIAN, N. A.; COSTA, B. S.; PARIZ, C. M.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Acúmulo de nutrientes e tempo de decomposição da palhada de espécies forrageiras em função de épocas de semeadura. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 31, n. 3, p. 818-829, 2015c.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; LOPES, K. S. M.; YOKOBATAKE, K. L. A.; FERREIRA, J. P.; LIMA, C. G. R.; SOUZA, D. M. Effect of intercropped tropical perennial grasses on the production of sorghum-based silage. **Agronomy Journal**. Madison, v. 108, n. 6, p. 2379-2390, 2016.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; LIMA, C. G. R.; CASTILHOS, A. M.; SOUZA, D. M.; BONINI, C. S. B.; PARIZ, C. M. Yield and nutritive value of the silage of corn intercropped with tropical perennial grasses. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n. 1, p. 63-73, 2017.

COSTA, C. H. M.; CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and gypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 74, p. 119-132, 2016.

CORSI, M. Dica de especialista: melhor resposta no verão (entrevista). **DBO Rural**, São Paulo, v.17, n. 218, p. 62, 1998.

CORREA, J. C.; REICHARDT, K. Efeito do tempo de uso das pastagens sobre as propriedades de um Latossolo Amarelo da Amazônia Central. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, p. 107-114, 1995.

CRUSCIOL, C. A. C.; MATEUS, G. P.; NASCENTE, A. S.; MARTINS, P. O.; BORGHI, E.; PARIZ, C. M. An innovative crop-forage intercrop system: early cycle soybean cultivars and palisadegrass. **Agronomy Journal**, Madison, v. 104, p. 1085-1095, 2012.

CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; MATEUS, G. P.; BORGHI, E.; LELES, E. P.; SANTOS, N. C. B. Effect of intercropping on yields of corn with different relative maturities and palisadegrass. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, p. 599-606, 2013.

CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; MATEUS, G. P.; PARIZ, C. M.; MARTINS, P. O.; BORGHI, E. Intercropping soybean and palisadegrass for enhanced land use efficiency and revenue in a no till system. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 58, p. 53-62, 2014.

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**, Madison, v. 107, n. 6, p. 2271-2280, 2015.

CRUSCIOL, C. A. C.; ARTIGIANI, A. C. C. A.; ARF, O.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; SORATTO, R. P.; NASCENTE, A. S.; ALVAREZ, R. C. F. Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phosphogypsum in a tropical no-till system. **Catena**, Cremlingen, v. 137, p. 87-99, 2016a.

CRUSCIOL, C. A. C.; MARQUES, R. R.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; SORATTO, R. P.; COSTA, C. H. M.; FERRARI NETO, J.; CASTRO, G. S. A.; PARIZ, C. M.; CASTILHOS, A. M. Annual crop rotation of tropical pastures with no-till soil as affected by lime surface application. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 80, p. 88-104, 2016b.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; HONGWEN, L. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, Beijing, v. 3, p. 1-25, 2010.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3, p. 201-214, 2004.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 year. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, p. 87-95, 2005.

DOURADO NETO, D.; Van LIER, Q.J.; BOTREL, T.A.; LIBARDI, P.L. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de van Genuchten. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 1, p. 92-102, 1990.

DREWRY, J. J.; CAMERON, K. C.; BUCHAN G. D. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing - a review. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 46, p. 237-256, 2008.

EDWARDS, A. P.; BREMNER, J. M. Dispersion of soil particles by sonic vibration. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 18, p. 47-63, 1967.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho. Guaíba, RS: Agropecuária**, 360 p., 2000.

FAO. **An international consultation on integrated croplivestock systems for development: The way forward for sustainable production intensification**. Integrated Crop Management, v. 13, 64 p., 2010.

FAO. **Integrated Crop-Livestock Systems (ICLS)**. Disponível em: <<http://www.fao.org/agriculture/crops/core-themes/theme/spi/scpi-home/managing-ecosystems/integrated-crop-livestock-systems/en/>> Acesso em: 9 set. 2017.

FERREIRA, D. F. Sisvar: um sistema computacional de análise estatística. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FERREIRA, E. V. O.; ANGHINONI, I.; ANDRIGHETTI, M. H.; MARTINS, A. P.; CARVALHO, P. C. F. Ciclagem e balanço de potássio e produtividade de soja na integração lavoura-pecuária sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 161-169, 2011.

FLORES, J. P. C.; ANGHINONI, I.; CASSOL, L. C.; CARVALHO, P. C. F.; LEITE, J. G. D. B.; FRAGA, T. I. Atributos físicos do solo, rendimento de soja em sistema

plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 771-80, 2007.

FRANCHINI, J. C.; GONZALEZ-VILA, F. J.; CABRERA, F.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Rapid transformations of plant water-soluble organic compounds in relation to cation mobilization in an acid Oxisol. **Plant Soil**, v. 231, p. 55-63, 2001.

FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 66, p. 95-106, 2002.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A. Crop and cattle production responses to tillage and cover crop management in an integrated crop–livestock system in the southeastern USA. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam v. 57, p. 62-70, 2014.

FONTANELI, R. S.; AMBROSI, I.; SANTOS, H. P.; IGNACZAK, J. C.; ZOLDAN, S. M. Análise econômica de sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno, em sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 11, p. 2129-2137, 2000.

FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; DEL DUCA, L. J.; RODRIGUES, O.; TEIXEIRA, M. C. C.; NASCIMENTO JUNIOR, A.; MINELLA, E.; CAIERAO, E.; MORI, C.; OLIVEIRA, J. T.; MARIANI, F. Potencial de rendimento de cereais de inverno de duplo propósito. In: FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S. (Ed.). **Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região sul-brasileira**. Passo Fundo, RS: Embrapa Trigo, 2009.

GARAY, A. H.; SOLLENBERGER, L. E.; McDONALD, D. C.; RUEGSEGGER, G. J.; KALMBACHER, R. S.; MISLEVY, P. Nitrogen fertilization and stocking rate affect stargrass pasture and cattle performance. **Crop Science**, Madison, v. 44, n. 4, p.1348-1354, 2004.

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**, Madison, v. 77, p. 1724-1731, 2013.

GARCIA, C. M. P.; COSTA, C.; ANDREOTTI, M.; MEIRELLES, P. R. L.; PARIZ, C. M.; FREITAS, L. A.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. 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 Soil Research**, Collingwood, v. 10, p. 1564-1571, 2016.

GENRO JUNIOR, S. A. **Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas no sistema plantio direto**. 2002. 90 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2002.

GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; CHIAPINOTTO, I. C.; HÜBNER, A. P.; MARQUES, M. G.; CADORE, F. Consorciação de plantas de cobertura no outono/inverno como fonte de nitrogênio ao milho em sistema plantio direto: II. Potencial de fornecimento de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 751-762, 2004.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soilwater suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 32, p. 180-186, 1968.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, p. 121-45, 2005.

HERRERO, M.; THORNTON, P. K.; NOTENBAERT, A. M.; WOOD, S.; MSANGI, S.; FREEMAN, H. A.; BOSSIO, D.; DIXON, J.; PETERS, M.; Van de STEEG, J.; LYNAM, J.; PARTHASARATHY RAO, P.; MACMILLAN, B.; GERARD, B.; McDERMOTT, J.; SERÉ, C.; ROSEGRANT, M. Smart investments in sustainable food production: revisiting mixed crop-livestock systems. **Science**, Washington, v. 327, p. 822-825, 2010.

HEINRICHS, R.; VITTI, G. C.; MOREIRA, A.; FIGUEIREDO, P. A. M.; FANCELLI, A. L.; CORAZZA, E. J. Características químicas de solo e rendimento de fitomassa de adubos verdes e de grãos de milho, decorrente do cultivo consorciado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 71 - 79, 2005.

HILL, R. L.; CRUSE, R. M. Tillage effects on bulk density and soil strength of two Mollisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 1270-1273, 1985.

HOANG, V. Analysis of productive performance of crop production systems: An integrated analytical framework. **Agricultural Systems**, Oxford, v. 116, n. 1, p. 16-24, 2013.

HSU, P. H. Aluminum hydroxides and oxyhydroxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 331-378.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Inoculation of *Brachiaria* spp. with the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*: An environment-friendly component in the reclamation of degraded pastures in the tropics. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 221, p. 125-131, 2016.

JAKELAITIS, A.; DANIEL, T. A. D.; ALEXANDRINO, E.; SIMÕES, L. P.; SOUZA, K. V.; LUDTKE, J. Cultivares de milho e de gramíneas forrageiras sob monocultivo e consorciação. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, p. 380-387, 2010.

JAKELAITIS, A.; SILVA, A. F.; SILVA, A. A.; FERREIRA, L. R.; FREITAS, F. C. L.; VIANA, R. G. Influência de herbicidas e de sistemas de semeadura de *Brachiaria brizantha* consorciada com milho. **Planta daninha**, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 59-67, 2005.

JAREMTCHUK, A. R.; JAREMTCHUK, C. C.; BAGLIOLI, B.; MEDRADO, M. T.; KOZLOWSKI, L. A.; COSTA, C.; MADEIRA, H. M. F. Características agronômicas e bromatológicas de vinte genótipos de milho (*Zea mays* L.) para silagem na região leste paranaense. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, Maringá, v. 27, n. 2, p. 181-188, 2005.

JORIS, H. A. W.; CAIRES, E. F.; SCHARR, D. A.; BINI, A. R.; HALISK, A. Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 162, p. 68-77, 2016.

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

KLIEMANN, H. J.; BRAZ, A. J. B. P.; SILVEIRA, P. M. Taxa de composição de resíduos de espécies de cobertura em Latossolo Vermelho Distroférico. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 36, p. 21-28, 2006.

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. et al. **Sistema Santa Fé – tecnologia Embrapa**: integração lavoura-pecuária pelo consórcio de culturas anuais com forrageiras, em áreas de

lavoura, nos sistemas direto e convencional. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2000. (Circular técnica, 38).

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.

KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H.; THUNG, M.; OLIVEIRA, F. R. de A. **Manejo antecipado do nitrogênio nas principais culturas anuais**. Informações Agronômicas. Piracicaba, n. 113, p. 1-24, mar. 2006. Encarte técnico.

KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H.; COBUCCI, T. **Opções e vantagens da integração lavoura-pecuária a produção de forragens na entressafra**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 28, p. 16-29, 2007.

KRUTZMANN, A.; CECATO, U.; SILVA, P. A.; TORMENA, C. A.; IWAMOTO, B. S.; MARTINS, E. N. Palhadas de gramíneas tropicais e rendimento da soja no sistema de integração lavoura-pecuária. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 29, n. 4, p. 842-851, 2013.

LANDERS, J. N. Tropical crop-livestock systems in conservation agriculture: the Brazilian experience. In: **Integrated Crop Management**. v. 5, 1.ed. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2007. 92 p.

LANZANOVA, M. E.; ELTZ, F. L. F.; NICOLOSO, R. S.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J.; ROCHA, M. R. Atributos físicos de um Argissolo em sistemas de culturas de longa duração sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1333-1342, 2010.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C. Estimating critical stress in unsaturated soils from change in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 44, p. 1127-1132, 1980.

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**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 177-189, 2009.

LEONEL, F. P.; PEREIRA, J. C.; COSTA, M. G.; MARCO JÚNIOR, P.; LARA, L. A.; QUEIROZ, A. C. Consórcio capim-braquiária e milho: produtividade das culturas e

características qualitativas das silagens feitas com plantas em diferentes idades. **Revista Brasileira de Zootecnia**. Viçosa, v. 37, n. 12, p. 2233-2242, 2008.

LINDHAUER, M. G. The role of potassium in the plant with emphasis on stress conditions (water, temperature, salinity). In: Proceedings of the potassium symposium. Pretoria, 1985. **Proceedings**. Pretoria, International Potash Institute and Fertilizer Society of South Africa, 1985. P. 95-113.

LOPES, A. S. **Available water, phosphorus fixation and zinc levels in Brazilian Cerrado soils in relation to their physical, chemical and mineralogical properties**. These (PhD – Doctorate) - Department of Soil Science, North Carolina State University, Raleigh, 1977.

LOPES, M. L. T.; CARVALHO, P. C. F.; ANGHINONI, A.; SANTOS, D. T.; KUSS, F.; FREITAS, F. K.; FLORES, J. P. C. Sistema de integração lavoura-pecuária: desempenho e qualidade da carcaça de novilhos superprecoces terminados em pastagem de aveia e azevém manejada sob diferentes alturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 1, p. 178-184, 2008.

LOPES, M. L. T.; CARVALHO, P. C. F.; ANGHINONI, A.; SANTOS, D. T.; AGUINAGA, A. A. Q.; FLORES, J. P. C.; MORAES, A. Sistema de integração lavoura-pecuária: Efeito do manejo da altura em pastagem de aveia preta, azevém anual sobre o rendimento da cultura da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p.1499-1506, 2009.

LOSS, A.; PEREIRA, M. P.; GIÁCOMO, S. G.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1269-1276, 2011.

LOURENTE, E. R. P.; MERCANTE, F. M.; MARCHETTI, M. E.; SOUZA, L. C. F.; SOUZA, C. M. A.; GONÇALVES, M. C.; SILVA, M. A. G. Rotação de culturas e relações com atributos químicos e microbiológicos do solo e produtividade do milho. **Semina**, Londrina, v. 31, n. 4, p. 829-842, 2010.

LUNARDI, CARVALHO, P. C. F.; TREIN, C. R.; COSTA, J. A.; CAUDURO, G. F.; BARBOSA, C. M. P.; AGUINAGA, A. A. Q. Rendimento de soja em sistema de integração lavoura-pecuária: efeito de métodos e intensidades de pastejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 3, p. 795- 801, 2008.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 38, p. 133-146, 2009.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MARCHÃO, R. L. **Integração lavoura-pecuária num latossolo do cerrado: impacto na física, matéria orgânica e macrofauna**. 2007. 153p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia 2007.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**, 2. ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MATEUS, G. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; BORGHI, E.; COSTA, C.; MARTELLO, J. M.; FRANZLUEBBERS, A. J.; CASTILHOS, A. M. Sidedress nitrogen application rates to sorghum intercropped with tropical perennial grasses. **Agronomy Journal**, Madison, v. 108, p. 433-447, 2016.

MELLO, L. M. M. **Integração agricultura-pecuária em plantio direto: atributos físicos e cobertura residual do solo, produção de forragem e desempenho econômico**. 2001, 72 f. Tese (Livre Docência) – Universidade Paulista Julho de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2001.

MENDONÇA, V. Z.; MELLO, L. M. M.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, F. C. B. L.; LIMA, R. C.; VALÉRIO FILHO, W. V.; YANO, E. H. Avaliação dos atributos físicos do solo em consórcio de forrageiras, milho em sucessão com soja em região de cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 251-259, 2013.

MORAES, A.; CARVALHO, P. C. F.; ANGHINONI, I.; LUSTOSA, S. B. C.; COSTA, S. E. V. G. A.; KUNRATH, T. R. Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 57, p. 4-9, 2014a.

MORAES, A.; CARVALHO, P. C. F.; LUSTOSA, S. B. C.; LANG, C. R.; DEISS, L. Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, p. 1024-1031, 2014b.

MOREIRA, A. L.; REIS, R. A.; SIMILI, F. F.; PEDREIRA, M. S.; ROTH, M. T. P.; RUGGIERI, A. C. Época de sobressemeadura de gramíneas anuais de inverno e de verão no capim Tifton 85: valor nutritivo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 2, p. 335-343, 2006.

MOTA, M. R.; SANGOI, L.; SCHENATTO, D. E.; GIORDANI, W.; BONIATTI, C. M.; DALL'IGNA, L. Fontes estabilizadas de nitrogênio como alternativa para aumentar o rendimento de grãos e a eficiência de uso do nitrogênio pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 512-522, 2015.

MÜLLER, M. M. L. **Influência do monocultivo na cana-de-açúcar e nas propriedades físicas e químicas de um Nitossolo Vermelho e um Neossolo Quartzarênico**. Botucatu, 2002, 120 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas.

NASCENTE, A. S.; STONE, L. F.; CRUSCIOL, C. A. C. Soil chemical properties affected by cover crops under no-tillage system. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 62, n. 4, p. 401-409, 2015.

NUNES, U. R.; ANDRADE JÚNIOR, V. C.; SILVA, E. B.; SANTOS, N. F.; COSTA, H. A. O.; FERREIRA, C. A. Covering crops straw production and common bean productivity in no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 943-948, 2006.

OLIVEIRA, F. H. T.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F. **Fertilidade do solo no sistema plantio direto**. Tópicos em ciência do solo. SBCS: Viçosa, MG, 2002. v. 2, p. 434-464.

OLIVEIRA, G. C., DIAS JÚNIOR, M. S., RESCKN, D. V. S., CURTI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 327-336, 2004.

OLIVEIRA, P.; KLUTHCOUSKI, J.; FAVARIN, J. L.; SANTOS, D. C. Consórcio de milho com braquiária e guandu-anão em sistema de dessecação parcial. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.10, p.1184-1192, 2011.

PARIZ, C. M.; ANDREOTTI, M.; TARSITANO, M. A. A.; BERGAMASCHINE, A. F.; BUZZETTI, S.; CHIODEROLLI, C. A. Desempenhos técnicos e econômicos da consorciação de milho com forrageiras dos gêneros *Panicum* e *Brachiaria* em sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 4, p. 360-370, 2009.

PARIZ, C. M.; ANDREOTTI, M.; BUZZETTI, S.; BERGAMASCHINE, A. F.; ULIAN, N. A.; FURLAN, L. C.; MEIRELLES, P. R. L.; CAVASANO, F. A. Straw decomposition of nitrogen-fertilized grasses after intercropping with corn crop in irrigated integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 2029-2037, 2011.

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**, Madison, v. 108, p. 2541-2553, 2016.

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**, Amsterdam, v. 108, n. 1, p. 35-54, 2017a.

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**, Oxford, 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. Silage production of corn intercropped with tropical forages in an integrated crop-livestock system with lambs. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n. 1, p. 54-62, 2017c.

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**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 911-920, 2008.

PAZIANI, S. F.; DUARTE, A. P.; NUSSIO, L. G.; GALLO, P. B.; BITTAR, C. M. M.; ZOPOLLATTO, M.; RECO, P. C. Características agronômicas e bromatológicas de híbridos de milho para produção de silagem. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 411-417, 2009.

PEREIRA, M. N.; VON PINHO, R. G.; BRUNO, R. G. S. et al. Ruminant degradability of hard or soft texture corn grain at three maturity stages. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 4, p. 358-363, 2004.

PIMENTEL, J. J. O.; SILVA, J. F. C.; VALADARES FILHO, S. C. et al. Efeito da suplementação protéica no valor nutritivo de silagens de milho e sorgo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 27, n. 5 p. 1042-1049, 1998.

PIRES, A. J. V.; CARVALHO, G. G. P.; GARCIA, R. et al. Fracionamento de carboidratos e proteínas de silagens de capim-elefante com casca de café, farelo de cacau ou farelo de mandioca. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 422-427, 2009.

PRICE, A. H.; STEELE, K. A.; GORHAM, J.; BRIDGES, J. M.; MOORE, B. J.; EVANS, J. L.; RICHARDSON, P.; JONES, R. G. W. Upland rice grown in soil-filled chambers and exposed to contrasting water-deficit regimes. I. Root distribution, water use and plant water status. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 76, p. 11-24, 2002.

RAIJ, B. Van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônômico, 284p, 2001.

RALISCH, R.; TAVARES FILHO, J.; ALMEIDA, M.V.P. Avaliação de um solo argiloso sob PD de uma escarificação na evolução da resistência do solo a penetração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30. 2001, Foz do Iguaçu. **Resumo expandido...** Foz do Iguaçu: CONBEA, 2001.CD-ROM.

RAIJ, B. VAN.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. rev. Campinas: IAC. 1996. 279 p. (Boletim Técnico, 100).

RAPHAEL, J. P. A.; CALONEGO, J. C.; MILORI, D. M. B. P.; ROSOLEM, C. A. Soil organic matter in crop rotations under no-till. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, p. 45-53, 2016.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, n.27, p. 29-48, 2003.

RAPHAEL, J. P. A.; CALONEGO, J. C.; MILORI, D. M. B. P.; ROSOLEM, C. A. Soil organic matter in crop rotations under no-till. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, p. 45-53, 2016.

REEVE, J. M.; CARTER, A. D. Water release characteristics. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C. E. (Eds.). **Soil analysis: physical methods**. New York: M. Dekker, 1991. p.111-160.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Editora Manole, 2004. 478 p.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, 2008.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; YANG, X. M.; FOX, C. A.; TAN, C. S.; ZHANG, T. Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 96 p. 316-330, 2007.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação de solo: causas e efeitos. **Semina Ciência Agrária**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

RITCHEY, K.D.; SILVA, J.E.; COSTA, U.F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savanna oxisols. **Soil Science**, Baltimore, v. 133, p. 378-382, 1982.

ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S. Lixiviação de potássio da palha de espécies de cobertura de solo de acordo com a quantidade de chuva aplicada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 355-362, 2003.

ROSOLEM, C. A.; SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Análise da situação geral. In: SORATTO, R. P.; ROSOLEM, C. A.; CRUSCIOL, C. A. C. (ed.). **Integração lavoura-pecuária-floresta: alguns exemplos no Brasil Central**. Botucatu: FEPAF, 2011. p.103-104.

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

ROSSATO, R. R. **Potencial de ciclagem de nitrogênio e potássio pelo nabo forrageiro intercalar ao cultivo do milho e trigo em plantio direto**. 2004.106 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

ROTH, C. H.; PAVAN, M. A. Effect of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 48, p. 351-361, 1991.

RUEDELL, J. A soja numa agricultura sustentável. In: SILVA, M. T. B. (Ed.). **A soja na rotação de culturas no plantio direto**. Cruz Alta: Fundacep/Fecotrigo, 1998. p. 1-34.

RUSSELLE, M. P.; ENTZ, M. H.; FRANZLUEBBERS, A. J. Reconsidering integrated crop livestock systems in North America. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 2, p. 325-334, 2007.

SANTI, A.; AMADO, T. J. C.; ACOSTA, J. A. A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I - Influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 1075-1083, 2003.

SANTOS, H. P.; SPERA, S. T.; TOMM, G. O.; KOCHANN, R. A.; ÁVILA, A. Efeito de sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas na fertilidade do solo, após vinte anos. **Bragantia**, Campinas, v. 67, p. 441-454, 2008.

SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; SPERA, S. T.; DREON, G. Fertilidade e teor de matéria orgânica do solo em sistemas de produção com integração lavoura e pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Pernambuco, v. 6, n. 3, p. 474-482, 2011.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SANO, E. E., ROSA, R., BRITO, J. L. S., FERREIRA, L. G. Semidetailed land use mapping in the Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 153-156. 2008.

SALTON, J. C. **Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical**. 2005. 158 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SALTON, J. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACHADO, L. A. Z.; OLIVEIRA, H. Pastoreio de aveia e compactação do solo. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 69, p. 32-34, 2002.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração

lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, p. 1349-1356, 2011.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Madson, v. 190, p. 70-79, 2014.

SBRISSIA, A. F.; SILVA, S. C. O ecossistema de pastagens e a produção animal. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 38, 2001 Piracicaba. **Anais...** Piracicaba, SP: SBZ, 2001. p. 731-754.

SEREIA, R. C.; LEITE, L. F.; ALVES, V. B.; CECCON, G. Crescimento de *Brachiaria* spp. e milho safrinha em cultivo consorciado. **Agrarian**, Dourados, v. 5, n. 18, p. 349-355, 2012.

SERVADIO, P.; MARSILI, A.; PAGLIAI, M.; PELLEGRINI, S.; VIGNOZZI, N. Effects on some clay soil qualities following the passage of rubber-tracked and wheeled tractors in central Italy. **Soil & Tillage Reserch**, Amsterdam, v. 61, p. 143-155, 2001.

SERVADIO, P.; MARSILI, A.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S.; PAGLIAI, M. Effects on some soil qualities in central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single and dual tires. **Soil & Tillage Reserch**, Amsterdam, v. 84, p. 87-100, 2005.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. **An analysis of variance test for normality (complete samples)**. *Biometrika* v. 52, p. 591-611, 1965.

SILGRAM, M.; SHEPHERD, M. A. The effects of cultivation on soil nitrogen mineralization. **Advance Agronomy**, San Diego, v. 65, p. 267- 311, 1999.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 311-317, 1998.

SILVA, F. F.; GONÇALVES, L. C.; RODRIGUEZ, J. A. S. et al. Qualidade de silagens de híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) de portes baixo, médio e alto com diferentes proporções de colmo+folhas/panícula. 2. Avaliação do valor nutritivo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 21-29, 1999.

SILVA, V. R.; REINERT, D.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 191-199, 2000.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 253- 260, 2001.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, p. 855-860, 2002.

SILVA, F. L.; COLLIER, L. S.; LAURINDO, P. C.; MENDES, M. M.; FISCHER, E. C. Potencial de restituição de nutrientes através de plantas de cobertura em plantio direto no Tocantins. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO: solo alicerce dos sistemas de produção, 29, 2003. Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: USP, 2003. CD ROOM.

SILVA, E. C.; FERREIRA, S. M.; SILVA, G. P.; ASSIS, R. L.; GUIMARÃES, G. L. Épocas e formas de aplicação de nitrogênio no milho sob plantio direto em solo de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 725-733, 2002.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L., eds. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.275-374.

SILVA, F. F.; FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; ARATANI, G.; ANDRIOLI, F. F., ANDRIOLI, I. Propriedades físicas de um Latossolo vermelho cultivado no sistema plantio direto. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 2, p. 191-204, 2008.

SILVEIRA, P. M.; BRAZ, A. J. B. P.; KLIEMANN, H. J.; ZIMMERMANN, F. J. P. Adubação nitrogenada no feijoeiro cultivado sob plantio direto em sucessão de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 4, p. 377-381, 2005.

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. Teores de nutrientes e de matéria orgânica afetados pela rotação de culturas e sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 387-394, 2001.

SMITH, C. W.; JOHNSTON, M. A.; LORENTZ, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. II. Soil properties affecting compactibility and compressibility. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, p. 335-354, 1997.

SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C.; Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, p. 5-22, 1995.

SOARES FILHO, C. V.; MONTEIRO, F. A.; CORSI, M. Recuperação de pastagens degradadas de *Brachiaria decumbens*. 1. Efeito de diferentes tratamentos de fertilização e manejo. **Pasturas Tropicais**, Cali, v. 14, n. 2, p. 26, 1992.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O.; Atributos físicos de um Hapludox em função de sistemas de produção integração lavoura-pecuária (ILP), sob plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, p. 37-44, 2010a.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeito de integração entre lavoura, pecuária, sob plantio direto em alguns atributos físicos do solo após dez anos. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 695-704, 2010b.

TAFFAREL, L. E.; CASTAGNARA, D. D.; MESQUITA, E. E.; NERES, M. A.; OLIVEIRA, P. S. R.; BATISTA, P. B. Produção de forrageiras de inverno sobressemeadas à lanço em pastagem de *Brachiaria brizantha*. In: CONGRESSO NORDESTINO DE PRODUÇÃO ANIMAL, 6, 2010, Mossoró. **Anais...** Mossoró: UFERSA, 2010. (CD-ROM).

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

TAVARES-FILHO, J.; FONSECA, I. C. B.; RIBON, A. A.; BARBOSA, G. M. C. Efeito da escarificação na condutividade hidráulica saturada de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 996-999, 2006.

TIRITAN, C. S.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C.A.C.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; FERNANDES, D. M.; NASCENTE, A. S. Tillage system and lime application in a tropical region: soil chemical fertility and corn yield in succession to degraded pastures. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, p. 437-447, 2016.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 33, p. 141-163, 1982.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 795-801, 2002.

TORMENA, C. A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 1023-1031, 2004.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. D. C.; DEXTER, A. R. Quantification of the soil physical quality of a tropical oxisol using the S index. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 65, p. 56-60, 2008.

TOLLNER, E.W.; HARGROVE, W.L.; LANGDALE, G.W. Influence of conventional and no-tillage practices on soil physical properties in the southern Piedmont. **Journal of Soil Water Conservation**, Ankeny v. 39, p. 73-76, 1984.

TRACY, B. F.; ZHANG, Y. Soil compaction, corn yield response, and soil nutrient pool dynamics within an integrated crop-livestock system in Illinois. **Crop Science**, Madison, v. 48, n. 3, p. 1211-1218, 2008.

TUPY, O.; OLIVEIRA, P. P. A.; VINHOLIS, M. M. B.; PRIMAVESI, O.; BERNADI, A. C. C. **Avaliação dos impactos econômicos, sociais e ambientais de tecnologias da Embrapa Pecuária Sudeste**. 8. Sobressemeadura de aveia forrageira em pastagens tropicais irrigadas no período seco. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006. 37p. (Documentos, 61).

van GENUCHTEN, M. T. A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-897, 1980.

VENDRAME, P. R. S.; BRITO, O. R.; GUIMARÃES, M. F.; MARTINS, E. S.; BECQUER, T. Fertility and acidity status of Latossolos (Oxisols) under pasture in the Brazilian Cerrado. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 82, n. 4, p. 1085-1094, 2010.

VILELA, L.; AYARZA, M. A.; MIRANDA, J. C. C. Agropastoral systems: activities developed by Cerrados Agricultural Research Center (Embrapa Cerrados). In: WORKSHOP ON AGROPASTORAL SYSTEM IN SOUTH AMERICA, 2001, Japan. **Proceedings...** JIRCAS, 2001. p. 19-33. (Working Report, 19).

YAN, X.; TI, C.; VITOUSEK, P.; CHEN, D.; LEIP, A.; CAI, Z.; ZHU, Z. Fertilizer nitrogen recovery efficiencies in crop production systems of China with and without consideration of the residual effect of nitrogen. **Environmental Research Letters**, Berkeley, v. 9, n. 9, p. 1-9, 2014.

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.

ZAGO, C. P. Cultura do sorgo para produção de silagem de alto valor nutritivo. In: SIMPÓSIO SOBRE NUTRIÇÃO DE BOVINOS, 4., 1991, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1991. p. 169-217.

ZAGO, C. P. Híbridos de milho e sorgo para silagem: características agronômicas e nutricionais. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM, 1, 2002, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 2002. p. 351-371.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, n. 1, p. 28-40, 2005.

ZOBECK, T. M.; SCHILLINGER, W. F. **Soil and water conservation advances in the United States**. Soil Science Society of America: Madison, WI, 2010.

## APÊNDICES

Apêndice 1. Parâmetros calculados para ajuste da curva característica da água no solo<sup>§</sup>, referente às amostras coletadas no 6<sup>o</sup> mês experimental em 2014.

Tratamento	Parâmetros					R <sup>2</sup> -
	$\alpha$	n	m	$\theta_r$	$\theta_s$	
<i>Camada 0,0 - 0,05 m</i>						
MB+ALA	1,588	2,917	0,057	0,160	0,366	0,990*
MB+ALI	2,517	3,155	0,051	0,148	0,361	0,993*
MBG+ALA	2,330	3,158	0,044	0,124	0,383	0,989*
MBG+ALI	17,894	1,873	0,040	0,000	0,438	0,998*
<i>Camada 0,05 - 0,1 m</i>						
MB+ALA	0,365	1,056	0,390	0,202	0,339	0,998*
MB+ALI	1,122	2,800	0,046	0,128	0,324	0,998*
MBG+ALA	0,869	5,002	0,056	0,191	0,341	0,983*
MBG+ALI	1,238	3,742	0,022	0,045	0,338	0,998*
<i>Camada 0,1 - 0,2 m</i>						
MB+ALA	0,546	1,854	0,240	0,213	0,336	0,997*
MB+ALI	0,777	1,875	0,095	0,163	0,321	0,999*
MBG+ALA	0,315	3,814	0,107	0,185	0,345	0,994*
MBG+ALI	0,876	2,062	0,063	0,111	0,341	0,998*
<i>Camada 0,2 - 0,4 m</i>						
MB+ALA	1,465	3,672	0,105	0,231	0,411	0,998*
MB+ALI	0,911	4,305	0,047	0,200	0,382	0,998*
MBG+ALA	0,767	5,555	0,048	0,217	0,356	0,987*
MBG+ALI	1,211	3,939	0,052	0,155	0,376	0,998*

<sup>§</sup> $\theta_v = \theta_r + ((\theta_s - \theta_r) / (1 + (\alpha\Psi)^n))^m$ ;  $\theta_v$ : umidade volumétrica do solo em cada potencial matricial;  $\theta_r$ : umidade volumétrica do solo no potencial matricial de -1500 kPa;  $\theta_s$ : umidade volumétrica do solo saturado;  $\Psi$ : é o potencial matricial;  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$ : coeficientes da equação;  $R^2$ : coeficiente de determinação; \*significativo a 5% de probabilidade pelo teste de F.

Apêndice 2. Parâmetros calculados para ajuste da curva característica da água no solo<sup>§</sup>, referente às amostras coletadas no 24<sup>o</sup> mês experimental em 2015.

Tratamento	Parâmetros					R <sup>2</sup> -
	$\alpha$	n	m	$\theta_r$	$\theta_s$	
<i>Camada 0,0 - 0,05 m</i>						
MB+ALA	0,329	3,113	0,146	0,175	0,354	0,993*
MB+ALI	0,867	5,247	0,045	0,178	0,318	0,995*
MBG+ALA	0,351	2,356	0,288	0,174	0,436	0,995*
MBG+ALI	0,544	6,762	0,046	0,177	0,335	0,994*
<i>Camada 0,05 - 0,1 m</i>						
MB+ALA	0,483	5,286	0,092	0,192	0,387	0,998*
MB+ALI	0,621	6,328	0,053	0,199	0,334	0,998*
MBG+ALA	0,196	1,934	0,453	0,196	0,464	0,998*
MBG+ALI	0,896	5,060	0,062	0,208	0,354	0,992*
<i>Camada 0,1 - 0,2 m</i>						
MB+ALA	0,277	1,730	0,414	0,169	0,375	0,976*
MB+ALI	0,999	4,905	0,048	0,159	0,315	0,991*
MBG+ALA	0,227	2,017	0,505	0,167	0,405	0,987*
MBG+ALI	0,774	5,835	0,062	0,167	0,354	0,985*
<i>Camada 0,2 - 0,4 m</i>						
MB+ALA	0,910	5,081	0,074	0,186	0,391	0,980*
MB+ALI	0,829	5,304	0,048	0,177	0,325	0,986*
MBG+ALA	0,462	4,467	0,131	0,193	0,405	0,987*
MBG+ALI	0,865	5,161	0,061	0,183	0,337	0,986*

<sup>§</sup> $\theta_v = \theta_r + ((\theta_s - \theta_r) / (1 + (\alpha\Psi)^n))^m$ ;  $\theta_v$ : umidade volumétrica do solo em cada potencial matricial;  $\theta_r$ : umidade volumétrica do solo no potencial matricial de -1500 kPa;  $\theta_s$ : umidade volumétrica do solo saturado;  $\Psi$ : é o potencial matricial;  $\alpha$ , n, m: coeficientes da equação; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação;

\*significativo a 5% de probabilidade pelo teste de F.