

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SIMONE ZANCHETTIN

VARIAÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO
SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA: PLANTIO DIRETO E CULTIVO
MÍNIMO

CURITIBA

2019

SIMONE ZANCHETTIN

VARIAÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO
SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA: PLANTIO DIRETO E CULTIVO
MÍNIMO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientadora: Profa. Dra. Karina Maria Viera Cavalieri Polizeli

Coorientadora: Profa. Dra. Rachel Muylaert Locks Guimarães

CURITIBA

2019

Zanchettin, Simone
Z27v Variação temporal e espacial das propriedades físicas do solo
sob integração lavoura-pecuária: plantio direto e cultivo mínimo /
Simone Zanchettin. - Curitiba, 2019.
63 p.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná.
Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo.

Orientadora: Karina Maria Viera Cavalieri Polizeli
Coorientadora: Rachel Muylaert Locks Guimarães

1. Solos - Densidade. 2. Solos - Porosidade. 3. Física do solo. I.
Polizeli, Karina Maria Viera Cavalieri. II. Guimarães, Rachel
Muylaert Locks. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

CDU 631.43



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS DO SOLO -
40001016014P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de SIMONE ZANCHETTIN intitulada: *Variação temporal e espacial das propriedades físicas do solo sob integração lavoura-pecuária: plantio direto e cultivo mínimo, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua* APROVADA no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Fevereiro de 2019.


KARINA MARIA VIEIRA CAVALIERE POLIZELI

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


JEFERSON DIECKOW
Avaliador Interno (UFPR)


RACHEL MUYLAERT LOCKS GUIMARÃES
Avaliador Externo (UTFPR - PB)

Dedico à minha família, em especial ao meu pai Simão Antonio Zanchettin, à minha mãe Maria Inês Pieta Zanchettin e ao meu irmão Gilberto Zanchettin.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Simão e Maria Inês e meu irmão Gilberto, pelo apoio incondicional durante o período longe de casa, que independente das minhas escolhas sempre me apoiaram.

Aos meus padrinhos Marizete e Léo Tonon, pelos conselhos dados ao longo desta jornada.

Às minhas primas queridas Gabriela e Patrícia sempre presentes nesse período com conselhos e experiências compartilhadas.

Aos amigos da época do ensino médio e da graduação que me ajudaram de um jeito ou de outro, pelas risadas, conversas jogadas fora, tudo isso me ajudou muito.

Aos verdadeiros amigos conquistados recentemente em Curitiba, pelo apoio diário, pelos conselhos e pelo companheirismo nos bons e maus momentos, tenham a certeza que ficaram no meu coração e serei eternamente grata.

Às minhas companheiras de apartamento Lilianne Maia, Samara Testoni e Priscila Simon pelas experiências transmitidas da pós-graduação e por fazerem eu me sentir realmente em casa.

Ao grupo de pesquisa em Física do solo da UTFPR, pela ajuda nas coletas das amostras e no laboratório ao longo desses três anos, sem vocês isso não seria possível.

À minha coorientadora professora Rachel Guimarães, pela ajuda desde as primeiras coletas, pelas dicas dadas desde a iniciação científica e por ter despertado o meu interesse na área da pesquisa.

À professora Karina pela orientação e auxílio dado ao longo desses dois anos de mestrado na UFPR.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de estudo em uma instituição gratuita e centenária, a UFPR.

À Fundação Araucária pela concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

A demanda mundial por alimentos vem crescendo progressivamente ao longo dos anos. Diante desta demanda emergente, incrementar a produtividade agrícola através do uso sustentável do solo tem sido um desafio em sistemas agrícolas. Neste sentido, o sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) vem sendo utilizado como uma alternativa viável, garantido a sustentabilidade do ambiente pela manutenção da cobertura vegetal no solo e pelos ganhos em produtividade agrícola, via incremento do teor de carbono orgânico e aumento da retenção e infiltração de água no solo. Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variação temporal e espacial das propriedades físicas do solo em sistema ILP sob plantio direto (PD) (área 1), sem o revolvimento do solo, e em cultivo mínimo (CM) (área 2), onde se utiliza a grade niveladora para a implantação da pastagem de inverno. As áreas de estudo foram implantadas no município de Novo Horizonte, estado de Santa Catarina, sul do Brasil. Em ambas áreas, foram coletadas amostras indeformadas de solo em anéis volumétricos, em quatro camadas 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20 m e em duas épocas: (i) Pós Pastejo (PP) - após a retirada dos animais e (ii) Pós Colheita (PC) - após a colheita da cultura de verão, no período de três safras (2015/16; 2016/17 e 2017/18, no Ano 1, 2 e 3, respectivamente). Foram determinados as seguintes propriedades físicas do solo: porosidade total (α), microporosidade (Mic), macroporosidade (Mac), densidade do solo (ρ_s), capacidade de aeração (CA) e capacidade de campo relativa (CCR), além da textura, carbono orgânico total e densidade de partículas. Observou-se variação das propriedades físicas do solo, sendo que algumas foram mais intensas que outras, dependendo da época, profundidade e ano. Ocorreram interações triplas (época X ano X camada) e duplas (época X ano, época X camada, ano X camada) para algumas variáveis, no entanto outras não diferiram estatisticamente. Não houve variação espacial de linha e entrelinha dos atributos físicos do solo. Para o PD, os atributos físicos do solo apresentaram variação temporal entre as épocas PP e PC, com maior expressividade nas camadas superficiais do solo (0,0-0,05 e 0,05-0,10 m), onde se tem maior influência do pisoteio animal, assim como nos agrícolas 1 e 3, que apresentaram elevada precipitação. Já na área de CM, ocorreram variações temporais entre as épocas, mas nas camadas subsuperficiais, 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m, possivelmente devido ao uso da grade niveladora no momento da implantação da pastagem, sendo que o ano 1 apresentou maior diferença devido à maior precipitação na época PP. Diante disso, pôde-se concluir que houve variação temporal dos atributos físicos do solo quanto à época (PC e PP). Esta variação foi relacionada à melhora destes atributos, possivelmente em função da capacidade de resiliência do solo.

Palavras-chave: Densidade do solo. Porosidade total. Atributos físicos do solo. Resiliência física do solo. Ciclos de umedecimento/secamento do solo.

ABSTRACT

The demand for food in the world has been growing progressively over the years. With this emerging demand, increasing agricultural productivity through sustainable land use has been a challenge in agriculture systems. In this way, the integrated crop-livestock systems (ICL) has been used as a suitable alternative, guaranteeing the sustainability of the environment by maintaining the vegetation in the soil surface and by increasing agricultural productivity, by improving the input of the organic carbon content and the retention and infiltration of soil water. In this way, the aim of this work was to evaluate the temporal and spatial variation of soil physical properties under no-tillage system (NT) (area 1), without soil rotation, and in minimum tillage (MT) (area 2), in which the harrowing is used for the implantation of the winter pasture. The study areas were located in Novo Horizonte city, state of Santa Catarina, southern Brazil. In both areas, undisturbed soil samples were collected in volumetric rings, in four layers 0.0-0.05 m; 0.05-0.10 m; 0.10-0.15 m; and in two periods: (i) Post-Grazing (PG), after the removal of the animals and (ii) Post-Harvest (PH), after harvesting the summer crop, in the period of three harvests (2015/16, 2016/17 and 2017/18 in Year 1, 2 and 3, respectively). The following soil physical attributes were determined: total porosity (α), microporosity (Mic), macroporosity (Mac), soil density (ρ_s), aeration capacity (AC) and relative field capacity (CCR), total organic carbon and particle density. It was observed a variation of the physical attributes of the soil, some of which were more intense than others, depending on the season, depth and year. There were triple (period X year X layer) and double interactions (period X year, period X layer, year X layer) for some variables, however others did not discriminate statistically. There was no spatial variation of row and interrow among the physical attributes of the soil. For the PD, the physical attributes of the soil presented temporal variation between the PP and PC seasons, with greater expressiveness in the superficial layers of the soil (0.0-0.05 and 0.05-0.10 m), where there is a greater influence of animal trampling, as well as in agricultural 1 and 3, which presented high precipitation. In the CM area, temporal variations occurred between the periods, but in the subsurface layers, 0.10-0.15 m and 0.15-0.20 m, possibly due to the use of the harrowing at the time of grazing, being that year 1 presented the largest difference due to the taller precipitation in the PP season. Therefore, it was possible to conclude that there was a temporal variation of the physical attributes of the soil regarding the period (PC and PP). This variation was related to the improvement of these attributes, possibly as a function of soil resilience.

Keywords: Bulk density. Total porosity. Soil physical attributes. Soil resilience. Wet-dry soil cycles.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO NO MUNICÍPIO DE NOVO HORIZONTE – SC.....	15
FIGURA 2 - PRECIPITAÇÃO ACUMULADA MENSAL DOS ÚLTIMOS 4 ANOS.	16
FIGURA 3 - PLANTIO DIRETO DURANTE O INVERNO (A) E NO VERÃO (B); CULTIVO MÍNIMO NO INVERNO (C) E NO VERÃO (D).	18
FIGURA 4 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA (A) X ANO (B) X CAMADA (C) PARA A DENSIDADE DO SOLO PLANTIO DIRETO..	29
FIGURA 5 - ANÁLISE SUBSUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA (A) X ANO (B) X CAMADA (C) PARA A POROSIDADE TOTAL PLANTIO DIRETO....	32
FIGURA 6 - ANÁLISE SUBSUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA (A) X ANO (B) X CAMADA (C) MICROPOROSIDADE PLANTIO DIRETO.	35
FIGURA 7 - ANÁLISE SUBSUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA (A) X ANO (B) X CAMADA (C) CAPACIDADE DE CAMPO RELATIVA PLANTIO DIRETO.	38
FIGURA 8 – ANÁLISE MULTIVARIADA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS COM AS ÉPOCAS NA AREA DE PLANTIO DIRETO.....	40
FIGURA 9 – ANÁLISE MULTIVARIADA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS COM OS ANOS NA AREA DE PLANTIO DIRETO.	41
FIGURA 10 - ANÁLISE MULTIVARIADA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS COM AS PROFUNDIDADES NA AREA DE PLANTIO DIRETO.....	42
FIGURA 11 - ANÁLISE SUBSUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA (A) X ANO (B) X CAMADA (C) MICROPOROSIDADE CULTIVO MÍNIMO.	50
FIGURA 12 - ANÁLISE SUBSUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA (A) X ANO (B) X CAMADA (C) MACROPOROSIDADE CULTIVO MÍNIMO.....	53
FIGURA 13 – ANÁLISE DE MULTIVARIADA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS COM A ÉPOCA PARA O CULTIVO MINIMO.....	55
FIGURA 14 – ANÁLISE DE MULTIVARIADA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS COM ANO PARA O CULTIVO MINIMO.....	56
FIGURA 15 - ANÁLISE DE MULTIVARIADA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS COM PROFUNDIDADE PARA O CULTIVO MINIMO.	57

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	20
TABELA 2 - RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO NO PLANTIO DIRETO.	23
TABELA 3 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA X CAMADA PARA A MACROPOROSIDADE DO PLANTIO DIRETO.....	24
TABELA 4 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ANO X CAMADA PARA A CAPACIDADE DE AERAÇÃO PLANTIO DIRETO.....	25
TABELA 5 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA X ANO PARA A CAPACIDADE DE AERAÇÃO PLANTIO DIRETO.....	26
TABELA 6 - RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO NO CULTIVO MÍNIMO.	43
TABELA 7 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ANO X CAMADA PARA A DENSIDADE DO SOLO NO CULTIVO MÍNIMO.....	44
TABELA 8 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA X ANO PARA A CAPACIDADE DE AERAÇÃO CULTIVO MÍNIMO.....	45
TABELA 9 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA X CAMADA PARA A CAPACIDADE DE AERAÇÃO CULTIVO MÍNIMO.....	46
TABELA 10 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA X ANO PARA A CAPACIDADE DE CAMPO RELATIVA CULTIVO MÍNIMO.....	47
TABELA 11 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA X CAMADA PARA A CAPACIDADE DE CAMPO RELATIVA CULTIVO MÍNIMO.....	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 MATERIAL E MÉTODOS	15
2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS	15
2.2 AMOSTRAGEM	19
2.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO.....	20
2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	21
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
3.1 PLANTIO DIRETO (PD)	22
3.2 CULTIVO MÍNIMO (CM).....	43
4 CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

De acordo com dados apresentados pela Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) a demanda global de alimentos têm aumentado proporcionalmente em relação ao crescimento populacional. Para acompanhar este crescimento, tornou-se urgente otimizar a produção agrícola aplicando-se estratégias que aumentem a produtividade por unidade de área, contribuam para a qualidade e a segurança alimentar e assegurem um impacto ambiental mínimo (LEMAIRE et al., 2014).

No contexto atual, a impossibilidade de dissociação entre o aumento de produtividade e a otimização dos recursos ambientais disponíveis, traz a necessidade da intensificação do uso sustentável do solo. Neste sentido, o sistema Integração Lavoura-Pecuária (ILP) é uma estratégia de produção sustentável, que integra atividades agrícolas e pecuárias, a valorização do homem e a viabilidade econômica, associando aumentos da produtividade com a conservação de recursos naturais.

A ILP é uma alternativa que abrange o grande e o pequeno produtor, de forma que o gado de corte e a agricultura altamente tecnificada predominam nas grandes propriedades e o gado de leite nas pequenas propriedades (BALBINOT JR et al., 2009). O incremento na renda se dá principalmente em função da diversificação das atividades na propriedade agrícola, uma vez que, em geral, a renda anual é proveniente somente das culturas de verão (CARASSAI et al., 2011).

Na região Sul do Brasil, o ILP consiste basicamente em uma associação entre cultivos agrícolas e produção animal em uma mesma área, onde ocorre uma alternância temporária de cultivos para grãos e pastagens de gramíneas e leguminosas para pecuária (KUNRATH et al., 2015). Espécies de pastagens anuais de inverno, como aveia-preta (*Avena strigosa* L.), aveia-branca (*Avena sativa* L.), centeio (*Secale cereale* L.) e azevém (*Lolium multiflorum* L.), tem sido as espécies mais utilizadas pelos produtores, pois apresentam melhor adaptação às condições edafoclimáticas da região (BALBINOT JR et al., 2009).

Quando bem estabelecida e manejada, a ILP proporciona benefícios nas propriedades químicas, biológicas e físicas do solo. Segundo Garrett et al. (2017), a ILP pode aumentar o estoque de carbono orgânico no solo possibilitando o acúmulo e retenção de nitrogênio e fósforo, assim como a atividade microbiana.

Adicionalmente, a ILP promove a manutenção anual da cobertura vegetal, reduzindo a incidência de pragas e doenças nas culturas de grãos, possibilitando a redução do uso de agrotóxicos; bem como minimizando processos de erosão hídrica e variações térmicas, proporcionando maior retenção e infiltração de água no sistema. (LEMAIRE et al., 2014).

Em vista dos inúmeros benefícios que o sistema ILP proporciona ao sistema agrícola, pode-se mencionar diversos trabalhos que verificaram tais efeitos. Moraes et al. (2014) verificaram que a produtividade das culturas de grãos cultivadas em sucessão ou rotação com pastagens foi maior em relação ao cultivo isolado na maioria dos experimentos realizados na região Sul do Brasil. No mesmo trabalho, destacou-se a importância do manejo adequado da ILP, em termos de controle de altura de pastagem, número de animais por área e umidade do solo, particularmente na ocasião de entrada e saída dos animais.

Dentre os componentes da ILP, a pastagem pode trazer benefícios para as culturas subsequentes e contribuir para um renda extra ao produtor, desde que manejada corretamente no período de inverno (CARASSAI et al., 2011). Neste sentido, a implantação da pastagem requer cuidados, pois pode interferir diretamente nas propriedades físicas do solo. Em algumas regiões do sul do Brasil, a ILP é implantada sob plantio direto, onde a semeadura da pastagem é direta, com ausência de revolvimento do solo. Entretanto, nas pequenas e médias propriedades, predomina-se a semadura à lanço, onde a incorporação da semente no solo é realizada com grade niveladora (VEIGA et al., 2012). Essa forma de semeadura da pastagem é muito comum no oeste de Santa Catarina, cerca de 70% das propriedades usam essa forma de semeadura, devido ao baixo investimento na semeadura, pois os implementos são usados para várias atividades na propriedade rural.

A ILP pode interferir nos atributos físicos do solo, aumentando a densidade e consequentemente reduzindo a porosidade total, principalmente em função do pisoteio dos animais durante o pastejo bem como a umidade do solo este período (BONETTI et al., 2019). Essas alterações ocorrem principalmente na camada de 0,00-0,10 m, sob alta intensidade de pastejo (pasto com aproximadamente 0,10 m de altura) (CONTE et al., 2011). Segundo Moreira et al. (2014), a altura de pastejo de 0,07 m resultou em redução da qualidade física do solo indicada pela densidade do solo e porosidade total na camada de 0,00-0,075 m, e pela macroporosidade e

capacidade de armazenamento de ar na camada de 0,075-0,15 m, após sete anos de sistema ILP. Tal condição pode ser revertida através da alternância de ciclos de umedecimento/secamento do solo, além da operação de semeadura com uso da haste sulcadora, que proporciona a mobilização do solo na linha de semeadura, possibilitando o restabelecimento da condição prévia do solo (CONTE et al., 2011).

Solos sob plantio direto apresentam variação espacial de propriedades físicas, como consequência do revolvimento efetuado somente na linha de semeadura. Esta prática proporciona melhorias em relação ao solo verificado na entrelinha, como o aumento e manutenção do aporte de matéria orgânica, continuação dos poros, menor densidade e resistência à penetração (FERREIRA et al., 2016).

Moreira et al. (2016), encontraram diferenças da linha com entrelinha para a densidade do solo sendo que os menores valores foram verificados na linha e os maiores na entrelinha, essas diferenças foram mais evidentes até a profundidade de 0,00-0,10 m. Entretanto a diferença de densidade do solo em amostragens subsequentes a cultura demonstram que houve um aumento da densidade não apresentando diferença da linha com entrelinha podendo se dizer o efeito da mobilização do solo não é persistente por longo períodos.

BETIOL et al. (2014) constataram diferença nos valores de porosidade e os índices de continuidade dos poros foram significativamente maior e a densidade do solo foi menor nas linha de semeadura do que na entrelinha. O uso da grade ocasiona a redução da densidade do solo na camada superficial (0,00-0,12 m de camada), no entanto, o potencial de compactação pode ser agravado pelo pisoteio dos animais (VEIGA et al., 2012). Valboa et al. (2015) observaram, sob cultivo mínimo, que nas camadas superficiais (0,00 - 0,10 m) a densidade do solo diminuiu, enquanto a macroporosidade aumentou. Por outro lado, na camada de 0,20-0,30 m verificou-se a diminuição da macroporosidade, como consequência do preparo do solo utilizado (gradagem).

Em sistemas agropecuários, os principais causadores de distúrbios no solo são o tráfego de máquinas, implementos agrícolas e animais, bem como um pastejo mal conduzido associado à práticas inadequadas de cultivo e manejo do solo (BAVOSO et al., 2012). Todavia, verifica-se que a recuperação do solo pode ocorrer mesmo diante de distúrbios causados pelo manejo. Esta recuperação se dá em função da resiliência do solo, e define-se pela capacidade do solo em recuperar-se

de eventos de degradação ou estresse de origem antrópica ou natural, retornando a um novo equilíbrio, semelhante à condição anterior (BONETTI et al., 2017). A resiliência física do solo está relacionada à processos regenerativos que incluem ciclos de umedecimento/secamento, bem como atividade biológica, crescimento de raízes e atividade da fauna edáfica (BAVOSO et al., 2012).

Em um estudo realizado por Gotardo et al. (2018), que analisaram dados de precipitação entre 1975 a 2014 do estado de Santa Catarina mostrou que a região do Extremo Oeste e Oeste do estado apresentaram elevados índices pluviométricos, ao longo desses anos, independente da estação climática. Esses elevados índices pluviométricos podem facilitar a regeneração do solo pois proporcionar mais ciclos de umedecimento/secamento no solo.

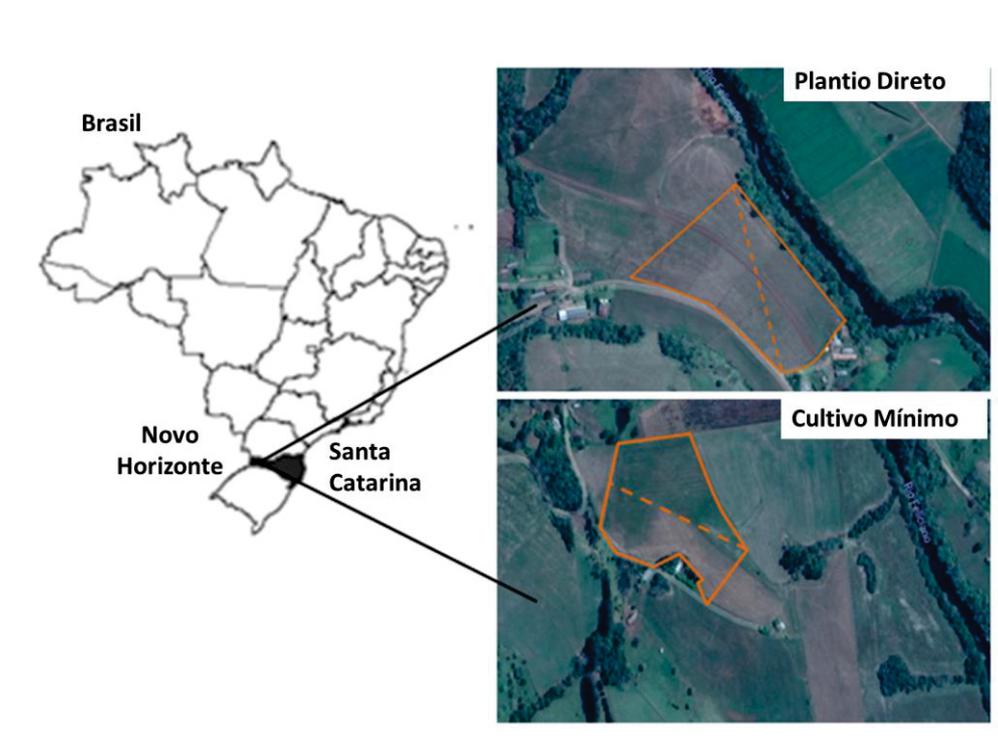
Diante deste contexto, a hipótese deste trabalho é de que há variação nas propriedades físicas do solo em ILP, podendo ser uma variação temporal e/ou espacial, cuja intensidade depende do preparo do solo. Sob esta hipótese, o presente estudo tem como objetivo analisar a variação temporal das propriedades físicas do solo sob ILP nos sistemas de plantio direto e cultivo mínimo ao longo do tempo, assim como analisar a variação espacial das propriedades físicas do solo, na linha e entrelinha no cultivo de verão. Como objetivos específicos, iremos a) verificar o comportamento das propriedades físicas do solo sob ILP em diferentes épocas, camadas e preparos; b) avaliar as propriedades físicas do solo na linha e entrelinha de plantio e em pós-colheita, em ambos sistemas de preparo; c) analisar o efeito da gradagem nas propriedades físicas do solo, e do pós-pastejo em diferentes camadas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS

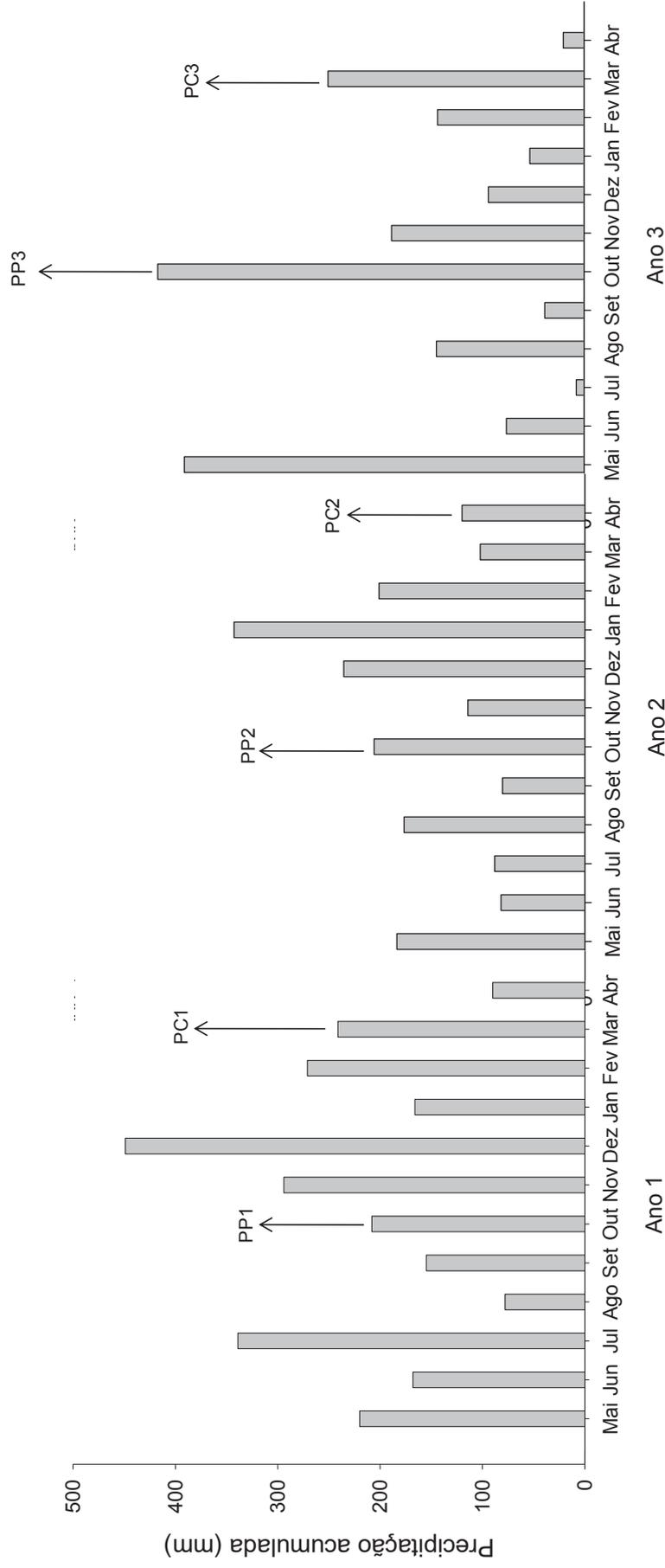
O experimento foi realizado em duas áreas com ILP sob diferentes sistemas de preparo de solo: Plantio Direto (PD) e Cultivo Mínimo (CM). Ambas as áreas apresentam 3 ha e estão localizadas no município de Novo Horizonte, Noroeste do estado de Santa Catarina/BR, conforme as coordenadas 26°26'45.3"S 52°50'02.6"W (FIGURA 1). O clima do local é o Cfb, (subtropical úmido, sem estação seca) com precipitação anual de 1900 a 2200 mm (ALVAREZ et al., 2014). Os dados de precipitação acumulada mensal referente ao período experimental, de 01/01/2015 a 15/11/2018, são provenientes da estação meteorológica convencional do Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR, localizada em Pato Branco-PR, (FIGURA 2). Em ambas áreas, o solo foi classificado como Cambissolo Háplico de textura argilosa (EMBRAPA, 2018).

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO NO MUNICÍPIO DE NOVO HORIZONTE – SC.



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 2 - PRECIPITAÇÃO ACUMULADA MENSAL DOS ÚLTIMOS 4 ANOS.



PC1, PC2, PC3= PÓS-COLHEITA 1, 2 E 3; PP1, PP2, PP3= PÓS-PASTEJO 1, 2 E 3.

FONTE: Dados iapar.

A área sob plantio direto (PD) está sob sistema ILP desde 2011 e a área sob cultivo mínimo (CM) desde 2002. Para ambos sistemas de preparo, as culturas de verão usadas ao longo dos anos foram soja (*Glycine max*) e milho (*Zea mays*), e no inverno a cultura usada para o pastejo dos animais foi a aveia-preta (*Avena strigosa* L.).

No PD (FIGURA 3 A, B) a semeadura foi direta tanto para as culturas de verão quanto de inverno, com espaçamento entre as linhas de semeadura para a cultura da soja (cultura de verão) de 0,45 m e para a aveia preta (cultura de inverno) o espaçamento de 0,20 m. No CM (FIGURA 3C) somente a semeadura da cultura de verão foi direta (FIGURA 3D), com o espaçamento entre as linhas de 0,45 m tanto para a cultura da soja quanto para o milho, já a semeadura da cultura de inverno foi realizada à lanço e incorporada ao solo através de uma gradagem, que atinge até 12 cm de profundidade. Para ambos sistemas de preparo, a semeadura da aveia foi realizada na primeira quinzena de abril, já para as culturas de milho e soja a semeadura foi realizada na segunda quinzena de outubro. A adubação de base para a cultura do milho foi realizada com a aplicação de 30 kg ha⁻¹ de N, 85 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 70 kg ha⁻¹ de K₂O, com aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N em cobertura. Para a cultura da soja, a adubação de base foi feita com aplicação de 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 75 kg ha⁻¹ de K₂O.

FIGURA 3 - PLANTIO DIRETO DURANTE O INVERNO (A) E NO VERÃO (B); CULTIVO MÍNIMO NO INVERNO (C) E NO VERÃO (D).



FONTE: O autor (2019).

Para a pastagem, utilizou-se vacas lactantes e novilhas das raças Jersey e Holandês, totalizando cerca de 10 UA ha⁻¹ (20 a 25 animais em cada área). O pastejo dos animais para ambas as áreas é rotativo e tem início quando a pastagem atinge 30 cm de altura, sendo que os mesmos permaneceram meio período do dia pastejando.

O período de pastejo na área de PD tem início na primeira quinzena de maio e se estende até a primeira quinzena de outubro, totalizando seis ciclos de pastejo, os animais eram retirados da área até que a pastagem atingisse 10 cm de altura, considerada alta intensidade de pastejo

Já no CM o período de pastejo tem início em maio e finaliza na primeira quinzena de setembro, totalizando cinco ciclos de pastejo, os animais permaneceram na área até que a altura da pastagem atingisse 15 cm, considerada moderada/alta intensidade de pastejo.

Após o fim de cada ciclo, os animais foram colocados em pastagem permanente. O retorno dos animais novamente nestes piquetes ocorreu quando a pastagem atingiu 30 cm de altura. O pastejo no CM foi realizado até um mês antes da dessecação para a semeadura da cultura de verão, já para o PD, a dessecação ocorreu logo após a retirada dos animais do pastejo.

2.2 AMOSTRAGEM

As amostragens de solo foram realizadas em transepto nos dois sistemas PD e CM em duas épocas: Pós-pastejo (PP) – imediatamente após a retirada dos animais e; Pós-colheita (PC) – imediatamente após a colheita da cultura de verão no período de três anos, totalizando seis coletas, sendo três coletas de PP (2015, 2016, 2017) e três coletas de PC (2016, 2017, 2018) conforme a figura 2.

Amostras indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos, de 0,05 m de altura por 0,06 m de diâmetro. No período PP foram coletadas amostras em 10 pontos ao longo do transepto nas duas áreas, já no período PC foram coletadas amostras em 20 pontos, sendo 10 pontos na linha e 10 na entrelinha da cultura, em cada área. Em cada ponto, foram amostradas camadas nas profundidades de 0,0–0,05; 0,05–0,10; 0,10–0,15; 0,15–0,20 m, sendo consideradas como camadas superficiais as profundidades de 0,0–0,05 e 0,05–0,10 m e camadas subsuperficiais as profundidades de 0,10–0,15 e 0,15–0,20 m, totalizando 720 amostras indeformadas ao final das seis coletas.

Após cada coleta, as amostras indeformadas foram mantidas sob refrigeração até o processamento. Posteriormente, determinou-se a densidade do solo, porosidade total, micro e macroporosidade, capacidade de campo relativa e capacidade de aeração. Além das amostras indeformadas, foram coletadas amostras deformadas em cada ponto e camada, as quais foram armazenadas em sacos plásticos para subsequente determinação de textura, densidade de partículas e carbono orgânico total (TABELA 1).

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DAS ÁREAS DE ESTUDO.

Camada (m)	PD	CM	PD	CM	PD	CM	PD	CM	PD	CM
	Argila		Silte (g kg ⁻¹)		Areia		ρ _p (g cm ⁻³)		COT (g kg ⁻¹)	
0,00-0,05	560	546	256	265	184	190	2,77	2,76	29,61	34,76
0,05-0,10	581	570	244	239	175	191	2,79	2,77	24,31	29,46
0,10-0,15	555	566	235	220	209	220	2,77	2,76	18,96	24,57
0,15-0,20	618	578	217	198	169	198	2,79	2,70	17,76	21,61

PD: Plantio Direto; CM: Cultivo Mínimo; ρ_p: Densidade de partículas; COT: Carbono orgânico total

FONTE: O autor (2019).

2.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

As amostras indeformadas de solo foram preparadas e então saturadas por 48 h, em bandejas com água, até 2/3 da altura do anel e, posteriormente, equilibradas a um potencial de -60 cm de coluna d'água, considerado como a máxima retenção de água. Mediu-se a massa de solo úmido, em uma balança, e posteriormente as amostras foram levadas à estufa a 105 °C por 24 h, para a obtenção da massa seca de solo. A porosidade total foi obtida conforme a equação 1:

$$\alpha = 1 - (\rho_s / \rho_p) \quad (1)$$

Onde:

α: porosidade total do solo (g cm⁻³);

ρ_s: densidade do solo (g cm⁻³);

ρ_p: densidade de partículas (g cm⁻³);

Para o cálculo da microporosidade considerou-se o volume de poros equivalentes à 50 μm de diâmetro, obtido através da umidade volumétrica determinada no potencial de -60 cm; enquanto que para o cálculo da macroporosidade utilizou-se a diferença entre a porosidade total e a microporosidade. A densidade do solo foi obtida conforme Grossman e Reinsch (2002).

A capacidade de aeração (CA) é a capacidade de armazenar e transmitir o ar no solo. White (2006) recomendou que a CA deve ser superior a 0,10 m³ m⁻³ para uma boa aeração na zona da raiz das plantas. A CA Foi calculada conforme a equação (2) de White (2006):

$$CA = \theta_s - \theta_{cc} \quad (2)$$

Onde:

CA: capacidade de aeração ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

θ_s : teor de água do solo saturado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

θ_{cc} : teor de água na capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

A capacidade de campo relativa (CCR) é a relação entre a capacidade de campo e porosidade do solo. A CCR indica a capacidade do solo armazenar água e ar em relação ao volume de total dos poros do solo. Reynolds et al. (2009) definiu que o intervalo de 0,6 a 0,7 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ é ideal entre capacidade de ar e a capacidade de água na zona de raiz de solos, esse intervalo maximiza a produção microbiana de nitrato, que normalmente é o nutriente limitante para o crescimento e rendimento das culturas. A CCR foi obtida conforme equação (3) de Reynolds et al. (2008):

$$CCR = 1 - (CA/\theta_s) \quad (3)$$

Onde:

CCR: capacidade de campo relativa ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

AC: capacidade de aeração ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

θ_s : teor de água do solo saturado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

Nas amostras deformadas, foram determinadas a textura do solo (areia, silte, argila) pelo método do densímetro (GEE e BAUDER, 1986), densidade de partículas pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 2017), e carbono orgânico total do solo (COT) por espectrofotometria, utilizando um espectrofotômetro colorimétrico, modelo Spectrophotometer SP 2000 UV.

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O delineamento experimental foi em parcelas sub-subdivididas, onde a parcela teve a época como fonte de variação, e as subparcelas, a camada e o ano. Em análise preliminar, a variável posição (linha e entrelinha) de amostragem não

apresentou diferença estatística, por isso, optou-se por usar os dados somente da linha para a realização da análise estatística. Os resultados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e à análise de variância. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, sendo todas as análises executadas pelo software Sisvar (FERREIRA, 2014).

Adicionalmente, realizou-se estatística multivariada dos parâmetros da análise de solo via análise de componentes principais (ACP), a fim de identificar e atribuir pesos àqueles que mais influenciaram entre os fatores avaliados (época, ano e profundidade).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PLANTIO DIRETO (PD)

Não observou-se variação espacial das propriedades físicas do solo analisados na linha e entrelinha da cultura no Pós-colheita (PC) para o Plantio direto (PD), resultados distintos foram encontrados por Betiol et al. (2014) e Moreira et al. (2016), que encontraram diferença espacial da linha com a entrelinha para as propriedades como densidade do solo, porosidade total essa diferença espacial foi mais evidente até a camada de 0,10 m de profundidade. Possivelmente não foi observado diferença na posição nesta área devido ao pouco tempo de implantação do ILP.

A macroporosidade (Mac) apresentou interação dupla entre época e camada, e a capacidade de aeração (CA) entre época e ano e, também para ano e camada. Enquanto que, densidade do solo (ρ_s), porosidade total (α), microporosidade (Mic) e capacidade de campo relativa (CCR) apresentaram tripla interação entre as fontes de variação época, ano e camada. Isoladamente, não foi observado valor significativo quando aplicado o teste F para as fontes de variação (TABELA 2).

TABELA 2 - RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO NO PLANTIO DIRETO.

Fonte de variação	Propriedades Físicas					
	ρ_s	α	Mic	Mac	CA	CCR
Época						
Ano						
Camada						
Época X Ano					*	
Ano X Camada					*	
Época X Camada				*		
Época X Ano X Camada	*	*	*			*
CV (%)	5,65	4,24	6,24	15,84	43,21	11,62
F	4,32	4,85	4,69	2,43	6,00	2,17
					4,23	

Densidade do solo: ρ_s (g cm^{-3}); α : Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Mic: Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Mac: Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) CA: Capacidade de aeração ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), CCR: Capacidade de campo relativa ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), CV: coeficiente de variação. *: níveis de significância pelo teste F a $p < 0,05$, e ausência do mesmo: não significativo.

FONTE: O autor (2019).

A Mac do solo apresentou diferença apenas entre as épocas na camada de 0,05-0,10 m ($0,13 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$), sendo no PP superior ao PC (TABELA 3), comportamento distinto do apresentado na literatura. Kunz et al. (2013) e Andreolla et al. (2015), encontraram valores abaixo do considerado ideal na época após o pastejo devido ao pisoteio animal, entretanto na época após a colheita a Mac aumentou devido ao efeito do sistema radicular. Os valores médios encontrados para a Mac estão acima de $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, ou seja, superior ao mínimo considerado restritivo ao desenvolvimento radicular (VOMOCIL; FLOCKER, 1961). Esta restrição está relacionada à processos vitais para as plantas, uma vez que os macroporos contribuem para as trocas gasosas e o crescimento livre de raízes da maioria das culturas. Todavia, principalmente no período de inverno, quando a umidade tende a ser elevada, é comum se verificar alterações na densidade do solo e no volume de macroporos em sistemas de ILP, como resultado do pisoteio animal. Embora essas alterações sejam reversíveis, devido à adição de matéria orgânica, ao sistema radicular das culturas e à resiliência do solo, faz-se estritamente necessário a aplicação de um manejo adequado para melhorar as condições físicas do solo (ANDREOLLA et al., 2015).

Ambus et al. (2018) e Bonetti et al. (2019) verificaram redução no valor de Mac para a profundidade de 0,00-0,05 m no PP, decorrente dos 15 e 14 anos de pisoteio animal, respectivamente. Bonetti et al. (2019) ressaltaram que o efeito do pisoteio animal ocorre de 0,00 a 0,05 m, devido à pequena área de contato e a

pressão do casco no solo. Destaca-se que estes autores avaliaram um sistema de ILP em PD a longo prazo, enquanto o sistema estudado no presente trabalho é de curta duração. Santos et al. (2011) afirmam que são escassos os experimentos de longa duração que permitam observar as alterações na qualidade do solo resultantes dos efeitos acumulados dos sistemas de manejo.

TABELA 3 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA X CAMADA PARA A MACROPOROSIDADE DO PLANTIO DIRETO.

Época	Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			
	Camada (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20
PP	0,13 aA	0,13 aA	0,12 aA	0,13 aA
PC	0,13 aA	0,12 bA	0,12 aA	0,13 aA

PP: Pós-Pastejo, PC: Pós-Colheita. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas comparam médias das épocas (coluna); Letras maiúsculas comparam médias das camadas (linha).

FONTE: O autor (2019).

Para a Capacidade de Aeração (CA), quando comparados os anos dentro de cada camada, o ano 2 e 3 na camada 0,00-0,05 m apresentaram os maiores valores (0,14 e 0,16 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente) (TABELA 4). Para as demais camadas, não houve diferença estatística entre os anos. No ano 1, verificou-se que a camada superficial de 0,00-0,05 m, obteve o menor valor médio de CA (0,09 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), quando comparado às camadas subsuperficiais de 0,10-0,15 m e 0,15-0,20 m, apresentando valor abaixo do considerado adequado para disponibilizar aeração para as culturas (0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) (WHITE, 2006; REYNOLDS et al., 2009) (TABELA 4).

O menor valor de CA observado na camada 0,00-0,05 m (0,09 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) pode ser consequência da elevada umidade do solo, uma vez que no ano 1 (2015/16) observou-se a ocorrência do fenômeno El Niño, com elevada precipitação (FIGURA 1). A CA do solo em sistema de plantio direto é afetada pela granulometria, umidade, estrutura e grau de compactação do solo. A porosidade de aeração é altamente influenciada pela estrutura e umidade do solo, sendo que o aumento do conteúdo de água do solo propicia a redução da quantidade de poros ocupados por ar (MENTGES et al., 2016). Isso pode ter contribuído para a manutenção da água nos macroporos ao longo do período, uma vez que a Mac esteve acima de 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, afetando a estrutura do solo em decorrência do pisoteio animal e do tráfego de máquinas, influenciando diretamente a CA (TABELA 4).

TABELA 4 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ANO X CAMADA PARA A CAPACIDADE DE AERAÇÃO PLANTIO DIRETO.

Ano	Capacidade de aeração (m^3m^{-3})			
	Camada (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20
1	0,09 bB	0,11 aAB	0,13 aA	0,12 aA
2	0,14 aAB	0,11 aB	0,14 aA	0,13 aAB
3	0,16 aA	0,15 aAB	0,14 aAB	0,13 aB

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas comparam médias dos anos (coluna); Letras maiúsculas comparam médias das camadas (linha).

FONTE: O autor (2019).

A TABELA 5 apresenta o desdobramento da CA para o ano, dentro de cada época, onde apenas o ano 2 obteve diferença significativa ($0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), de modo que a época PP apresentou-se superior ao PC ($0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). O ano 2 apresentou comportamento distinto do esperado, já que ocorreu redução da época PP para a PC ($0,15$ para $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Esse comportamento pode ter sido decorrente da menor precipitação verificada no período do pastejo (FIGURA 1), favorecendo a troca de gases.

Ao se comparar as épocas em de cada ano, não foi verificada diferença em PP, ou seja, a CA não variou com o tempo nesta época. Por outro lado, no PC a CA aumentou ao longo dos anos, apresentando maior CA no ano 3 ($0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Este desempenho pode ser indicativo de estabilização deste atributo juntamente à ILP sob plantio direto, pois a coleta referente ao ano 3 foi realizada sete anos após a implantação do sistema, considera-se que um sistema esta em equilíbrio após 5 anos de implantação.

Destaca-se que todos os valores encontrados estão acima do valor crítico de $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, entretanto abaixo do valor de $0,14 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, recomendado como mínimo para o desenvolvimento das plantas sem perdas causadas por deficiência de oxigênio na zona radicular (WHITE, 2006; REYNOLDS et al., 2009). De modo oposto aos presentes resultados, Castellini et al. (2013) e Nascimento et al. (2018) verificaram valores acima de $0,14 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ em área de plantio direto.

TABELA 5 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA X ANO PARA A CAPACIDADE DE AERAÇÃO PLANTIO DIRETO.

Época	Capacidade de aeração ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)		
	Ano		
	1	2	3
PP	0,12 aA	0,15 aA	0,13 aA
PC	0,11 aB	0,11 bB	0,15 aA

PP: Pós-Pastejo, PC:Pós-Colheita. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas comparam médias das épocas (coluna); Letras maiúsculas comparam médias dos anos (linha).

FONTE: O autor (2019).

A densidade do solo variou de 1, 13 a 1,34 g cm^{-3} . Houve diferença estatística na interação época X ano (FIGURA 4 A) nas camadas 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m para a ρ_s , enquanto que as demais camadas não apresentaram diferença estatística significativa entre as épocas, para cada ano estudado. A compactação é caracterizada pela redução de volume de solo, e a densidade do solo é a relação entre massa e volume, sendo um parâmetro prático para detectar a ocorrência de compactação (SILVA, 2012). Particularmente em áreas manejadas sob sistema PD, é incomum a ocorrência de camadas compactadas abaixo de 0,10 m de profundidade como consequência do pisoteio animal, o que também foi verificado por Conte et al. (2011).

Para a camada 0,00-0,05 m nos anos 1 e 3 ocorreram os maiores valores médios na época PP (1,34 g cm^{-3} e 1,30 g cm^{-3} , respectivamente), em relação ao PC, que obtiveram valores de 1,19 g cm^{-3} e 1,13 g cm^{-3} , respectivamente. Já a camada de 0,05-0,10 m apresentou o menor valor no PP no ano 1 (1,22 g cm^{-3}) quando comparado à PC no mesmo ano (1,32 g cm^{-3}), sendo que, no ano 3 o comportamento da ρ_s foi similar à camada de 0,00-0,05 m (FIGURA 4 A).

Ao verificar a variação da ρ_s entre as épocas, ocorreu redução do PP para a PC devido ao efeito dos ciclos de umedecimento/secamento (MOREIRA et al., 2016; AKSAKAL et al., 2019), assim como o efeito do sistema radicular da cultura de verão (MOREIRA et al., 2016). Em estudo semelhante, Ambus et al. (2018) e Bonetti et al. (2019), avaliando o comportamento dos atributos físicos do solo em ILP ao longo do tempo sob diferentes intensidades de pastejo e diferentes épocas, também constataram que ocorreu redução da ρ_s , atribuído principalmente aos ciclos de umedecimento/secamento do solo.

Quando comparados os anos dentro da interação época X camada, verificou-se diferenças em quase todas as camadas no PP (FIGURA 4 B), com

exceção de 0,10-0,15 m. Já no PC, apenas as camadas superficiais (0,00-0,05 e 0,05-0,10 m) foram estatisticamente diferentes entre os anos. Em PP, na camada de 0,00-0,05 m os anos 1 e 3 apresentaram as maiores densidades (1,34 e 1,31 g cm⁻³, respectivamente), diferindo-se do ano 2. Já para a época PC, para a mesma camada, observou-se o maior valor médio de ρ_s (1,26 g cm⁻³) no ano 2 em relação aos demais anos.

Na camada 0,05-0,10 m para a época PP, o maior valor médio foi para o ano 3 com 1,31 g cm⁻³ que diferiu do ano 1 (1,22 g cm⁻³), sendo que o ano 2 (1,26 g cm⁻³) foi igual aos demais. Na época PC, o maior valor médio de ρ_s foi para o ano 1, com 1,32 g cm⁻³, diferindo do ano 3, com 1,23 g cm⁻³, não diferindo do ano 2 (1,30 g cm⁻³), que apresentou-se similar aos demais. A camada 0,15-0,20 m apresentou diferença entre os anos somente para a época PP, onde o maior valor encontrado foi para o ano 3, com 1,28 g cm⁻³, que apresentou diferença dos anos 1 e 2, com 1,18 g cm⁻³ e 1,21 g cm⁻³, respectivamente (FIGURA 4 B).

Um dos fatores que podem estar relacionado à variação da ρ_s nos anos (FIGURA 4 B) é a precipitação anual. Os anos 1 e 3 apresentaram os maiores valores de ρ_s na época PP, bem como a maior precipitação (FIGURA 1). No ano 1 teve o fenômeno El Niño mais intenso dos últimos anos (HEINO et al., 2018), inclusive na região Sul do Brasil, onde teve alta precipitação, influenciando diretamente os atributos físicos do solo, sendo que a ρ_s foi a mais afetada. A precipitação acumulada nos períodos de pastejo dos anos 1 e 3 foi de 1165 e 1080 mm, respectivamente, esses valores são considerados altos, potencializando o efeito do pisoteio animal, pois a interação entre a pressão causada pelo casco dos animais associado ao aumento da umidade do solo em consequência da alta precipitação, aumentou a compactação, verificada pelo aumento da ρ_s no PP na camada superficial. A intensidade das alterações físicas no solo em áreas sob pastejo pode ser agravada quando o solo está com umidade na faixa mais favorável à deformação plástica, o que ocorre imediatamente acima do seu limite de friabilidade (CONTE et al., 2011).

Por outro lado, na época PC, verificou-se comportamento inverso, podendo estar relacionado ao maior número de ciclos de umedecimento/secamento, aspecto que garantiu maior resiliência ao solo (BONETTI et al., 2017) (FIGURA 4 B).

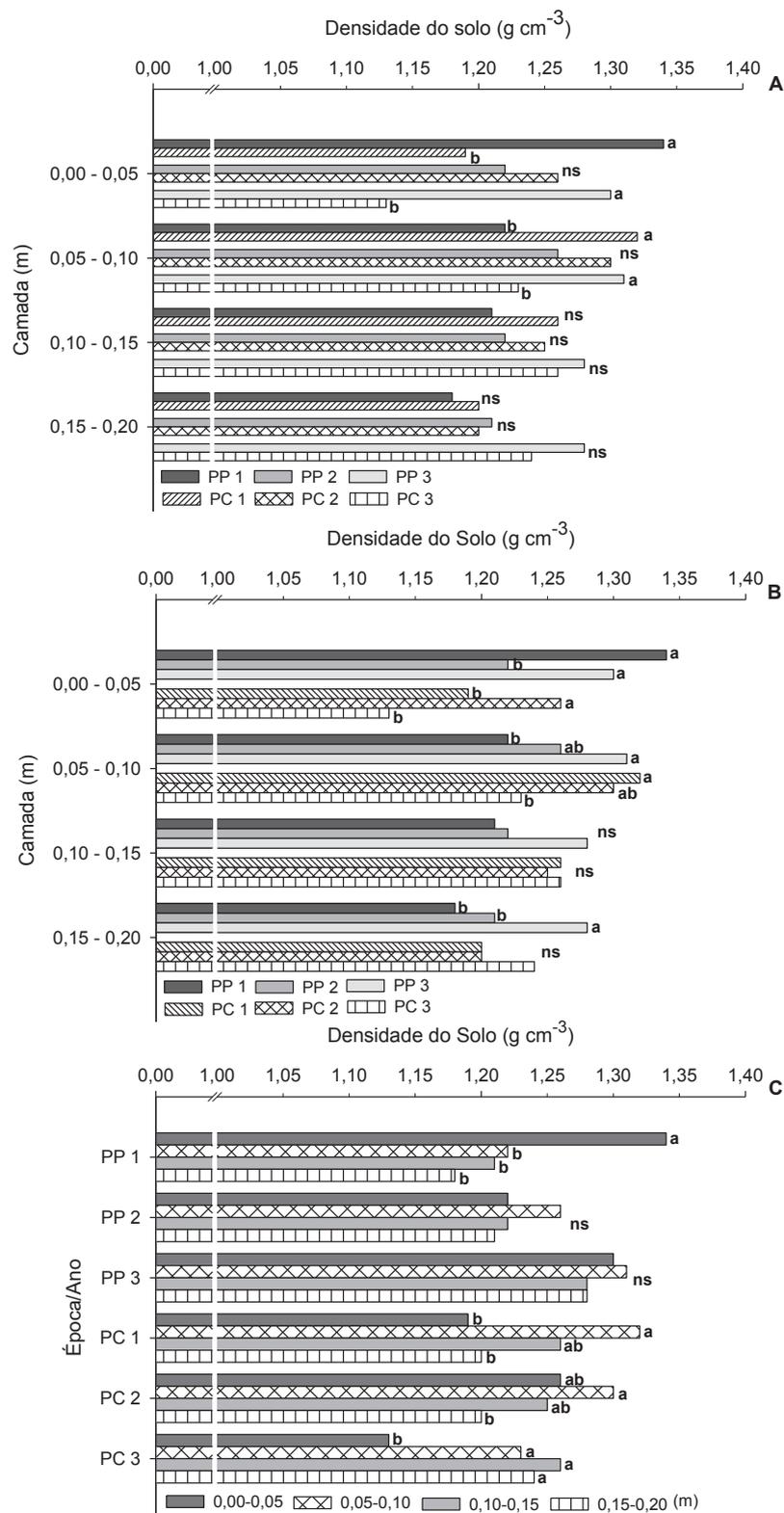
Na interação época x ano entre as camadas (FIGURA 4 C) verificou-se que na época PP apenas para o ano 1 houve diferença estatística da ρ_s entre camadas,

de modo que a camada 0,00-0,05 m obteve a maior ρ_s média em relação às demais ($1,34 \text{ g cm}^{-3}$), que não diferiram entre si. Do mesmo modo, esta variação está relacionada ao pisoteio animal associado à umidade elevada do solo.

Analisando a época PC, esta obteve diferenças entre camadas em todos os anos estudados (FIGURA 4 C). Em PC1, a ρ_s média na camada 0,05-0,10 m foi superior às demais camadas ($1,32 \text{ g cm}^{-3}$), com exceção da camada de 0,15-0,20 m. Em PC2, também ocorreu o maior valor médio na respectiva camada ($1,30 \text{ g cm}^{-3}$), diferindo apenas da camada 0,15-0,20 m. Já no PC3, a camada com o menor valor médio foi a de 0,00-0,05 m, sendo que as demais foram superiores e não diferiram entre si. Nota-se que a camada de 0,05-0,10 m no PC obteve valores mais elevados de ρ_s , independente do ano estudado. Em PD, quando não houver acúmulo de matéria orgânica, a ρ_s em camada superficial pode se apresentar maior (GENRO JR et al., 2004). Já o aumento da ρ_s em profundidade está relacionado com o efeito do tráfego de máquinas agrícolas no momento da colheita com umidade do solo inadequada (REICHERT et al., 2009).

Salienta-se que os valores médios de ρ_s variaram de $1,13$ a $1,34 \text{ g cm}^{-3}$, e estão dentro do limite aceitável para solos argilosos ($1,0$ a $1,40 \text{ g cm}^{-3}$) (VEPRASKAS, 1988; PACHEPSKY; PARK, 2015). Assim, em geral, a ρ_s variou significativamente apenas nas camadas superficiais em relação às épocas, no qual pode-se dizer que na maioria das avaliações o PC apresentou menor ρ_s que o PP.

FIGURA 4 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA (A) X ANO (B) X CAMADA (C) PARA A DENSIDADE DO SOLO PLANTIO DIRETO.



Letras diferentes indicam diferença estatística, dentro de cada grupo de fatores; ns indica não haver diferença estatística, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

FONTE: O autor (2019).

Para porosidade total (α), na interação Ano x Época dentro de camadas (FIGURA 5 A), verificou-se diferença apenas nas camadas 0,00-0,05 m para os anos 1 e 3, onde a α média foi maior em PC comparado ao PP, 0,57 e 0,51 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente, no ano 1 e, 0,56 e 0,53 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente no ano 3. Enquanto que, na camada 0,05-0,10 m houve diferença estatística entre as épocas somente no ano 1, sendo maior em PP (0,56 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em relação ao PC (0,52 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). A α não diferiu nas camadas subsuperficiais em relação às épocas no decorrer dos anos estudados e, em superfície pode-se dizer que o PC aumentou a mesma.

Os menores valores de α encontrados na época PP podem estar relacionados ao pisoteio animal que tem efeito mais expressivo nas camadas superficiais, decorrente do tamanho reduzido dos cascos dos animais, uma vez que quanto menor a área de contato, mais superficialmente a pressão será dissipada (LAMANDE; SCHJØNNING, 2011). Entretanto, na época PC percebe-se que houve um incremento da α . Resultados semelhantes foram encontrados por Bonetti et al. (2019), que também constataram aumento da α na época após a colheita, salientando que este comportamento foi resultado de ciclos de umedecimento/secamento que são mais intensos em superfície.

Quando comparado Época x Camada dentro de cada Ano, observou-se que houve diferença estatística entre os anos nas camadas 0,00-0,05 m para as ambas as épocas. O PP2 apresentou o maior valor médio de α , com 0,55 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, em relação aos demais, PP1 com 0,51 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e PP3 com 0,53 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, que não diferiram entre si. Já para PC, verificou-se que os anos 1 e 3 apresentaram os maiores valores médios de α , onde ocorreu diferença apenas do ano 1 para o ano 2 na mesma camada (FIGURA 5 B).

Para a camada 0,05-0,10 m houve diferença estatística somente na época PC, sendo que o PC3 apresentou o maior valor médio (0,55 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) seguido de PC2, com 0,54 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e PC1 com 0,52 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, que diferiu do PC3. Não houve diferenças significativas nas camadas subsuperficiais para PC. Entretanto, no PP ocorreram diferenças na camada de 0,15-0,20 m, sendo PP1 (0,57 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e PP2 (0,56 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) estatisticamente iguais, contudo o PP3 foi significativamente menor (0,54 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) ao PP1 (FIGURA 5 B).

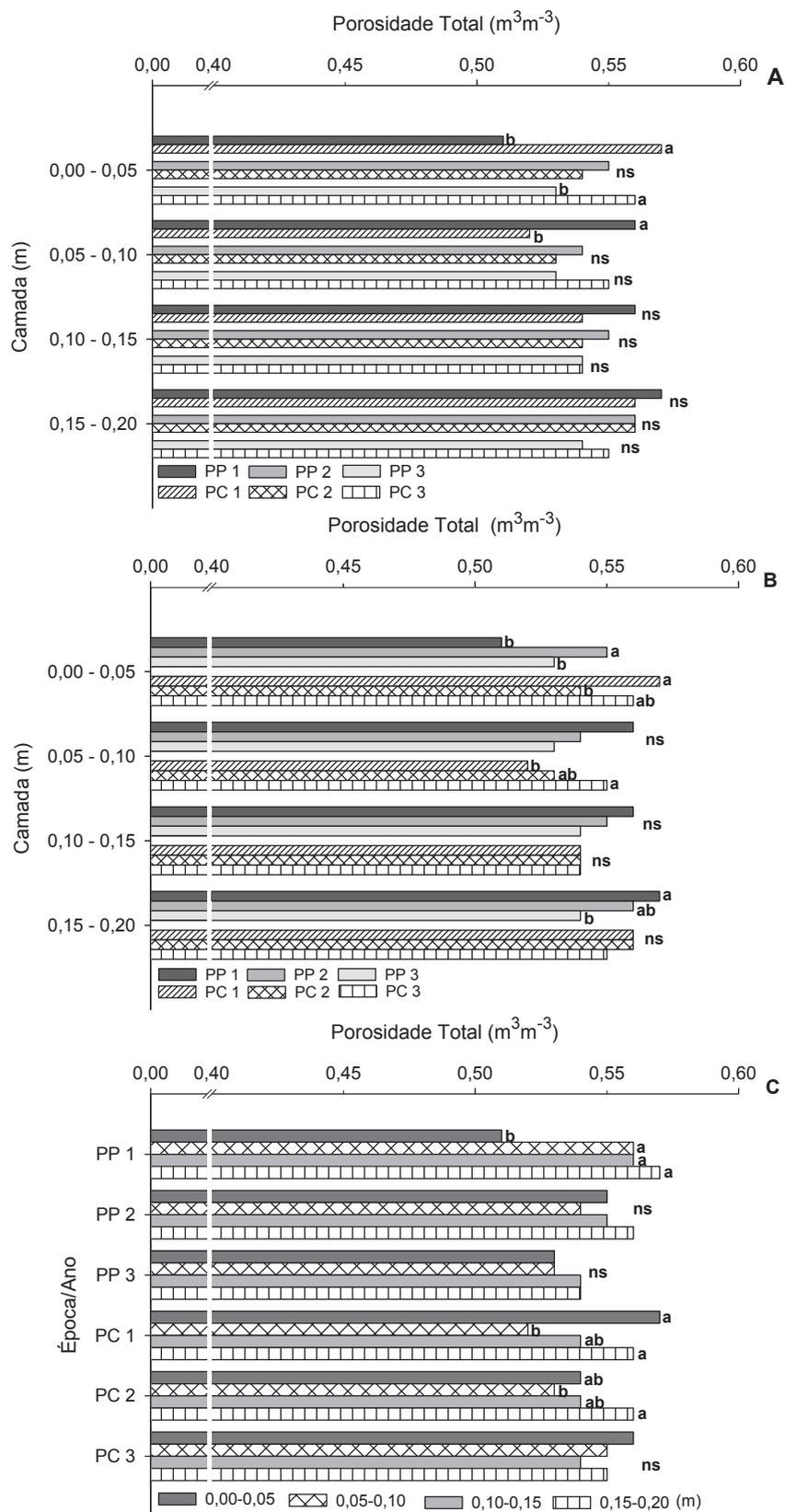
Entre os anos, a α aumentou na época PC na camada 0,05-0,10 m e a PP reduziu na camada 0,15-0,20 m. Os resultados apontam que nos anos com maior precipitação, a umidade permaneceu alta durante o pastejo, afetando a α , devido ao

rearranjo das partículas do solo, e conseqüentemente empacotamento destas. Comparando os anos na época PC, para a mesma camada (0,05-0,10 m), ocorreu maior incremento de α , podendo estar associado aos ciclos de umedecimento/secamento, permitindo que o solo apresentasse maior capacidade de resiliência. Segundo Bonetti et al. (2017), quanto maior o número de ciclos de umedecimento, mais rápido a estrutura física do solo se recupera de um estresse.

Ainda para a α , analisando Época x Ano entre as camadas (FIGURA 5 C), verifica-se que a α não diferiu em PP2, PP3 e PC3. Em PP1 a menor α média foi encontrada na camada 0,00-0,05 m (FIGURA 5 C), coincidindo com a maior ρ_s (1,34 g cm⁻³) (FIGURA 4 C), resultado semelhante foi encontrado por Bonetti et al. (2019). Enquanto que, no PC1 e no PC2 os menores valores médios foram observados sobre tudo na camada 0,05-0,10 m (FIGURA 5 C), da mesma forma, coincidindo com a maior ρ_s (1,32 e 1,30 g cm⁻³, respectivamente) (FIGURA 4 C).

Pode-se dizer que no PP a α variou significativamente entre os anos, porém se manteve estável ao final de três anos em todas as camadas, com exceção da camada de 0,10-0,20 m, na qual se reduziu com o tempo. Os valores médios de α ao longo do tempo variaram de 0,53 a 0,57 m³ m⁻³ dentro do limite de 0,40 a 0,65 m³ m⁻³ que é considerado adequado para solos argilosos.

FIGURA 5 - ANÁLISE SUBSUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA (A) X ANO (B) X CAMADA (C) PARA A POROSIDADE TOTAL PLANTIO DIRETO.



Letras diferentes indicam diferença estatística, dentro de cada grupo de fatores; ns indica não haver diferença estatística, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

FONTE: O autor (2019).

A Mic apresentou interação tripla entre época, ano e camada (TABELA 2). Para a interação Ano x Camada (FIGURA 6 A) verificou-se diferença estatística entre as épocas PP e PC, no ano 1 na camada 0,00-0,05 m e, ano 3 na camada 0,05-0,10 m. Em ambos, a Mic foi maior no PC, com valores médios de 0,44 e 0,42 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente para PC1 e PC3. A variação da Mic entre as épocas ocorreu na camada superficial.

Neste estudo, o aumento da Mic pode estar relacionado ao tráfego de máquinas durante a colheita em condições de alta umidade do solo. Segundo Reichert et al. (2009), com o tráfego de máquinas agrícolas e/ou animal, quando o solo permanece com alta umidade em grande parte do ciclo das culturas, sua capacidade de suporte é reduzida, aumentando a susceptibilidade à compactação, causando um novo rearranjo da estrutura do solo, e consequente aumento da Mic.

Quando comparado às épocas, o comportamento da Mic diferiu dos resultados encontrados por Ambus et al. (2018) e Bonetti et al. (2019), que verificaram redução da Mic após o pastejo para a pós colheita. Entretanto, os autores avaliaram um sistema de ILP em PD de longo prazo, enquanto o sistema estudado na presente pesquisa é de curta duração, consistindo na principal diferença entre os trabalhos.

Quando comparados Época x Camada entre os anos, observou-se diferença significativa apenas para a camada 0,00-0,05 m. No PP ocorreu a maior Mic média no ano 2 e a menor no ano 1, invertendo esse comportamento no PC. A Mic apresentou menores valores nos anos mais chuvosos (1 e 3) para a época PP e foi verificado um incremento da Mic para esses mesmos anos na época PC. Provavelmente este comportamento está relacionado à textura do solo (argilosa), que possui maior capacidade de retenção de água. Assim, o tráfego de máquinas no momento da colheita associado à umidade elevada do solo, resulta em aumento da Mic (KUNZ et al., 2013) (FIGURA 6 B).

A Mic não apresentou diferença significativa para Época x Ano entre camadas (FIGURA 6 C) para PP2, PP3 e PC3. Contudo, em PP1 e PC2 os menores valores médios foram de 0,38 e 0,39 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente, na camada 0,00-0,05 m. Por outro lado, nesta mesma camada verificou-se o maior valor médio de Mic em PC1 (0,44 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) diferindo da camada 0,05-0,10 (0,40 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) que apresentou o menor valor, já as camadas 0,10-0,15 (0,42 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e 0,15-0,20 m (0,43 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) não

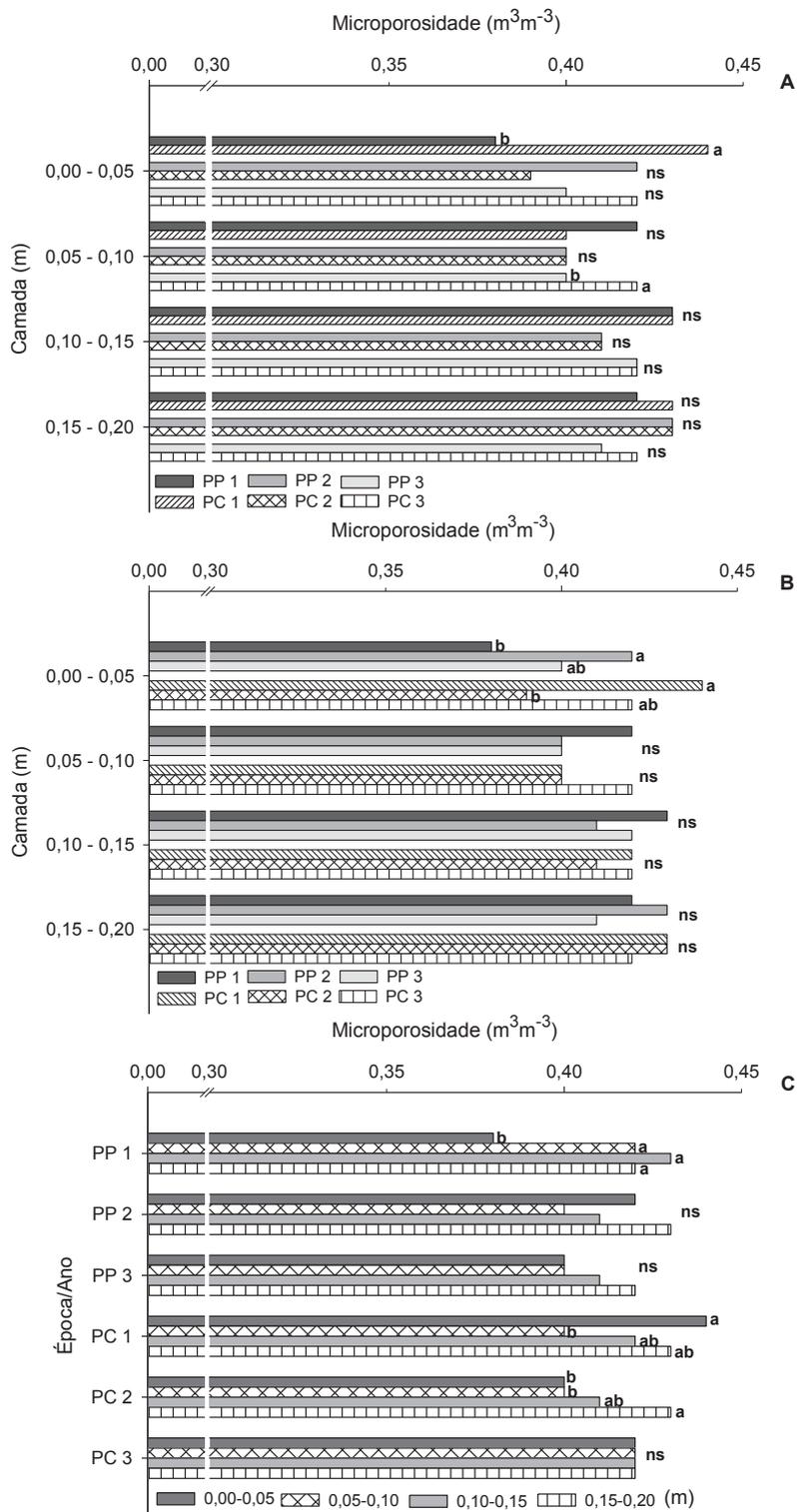
apresentaram diferença estatística entre si e nem com as demais. De forma geral, a maior Mic ocorreu nas camadas subsuperficiais.

No PP1 teve uma redução da Mic na camada e 0,00-0,05 m já nas demais camadas teve um incremento (FIGURA 6 C). Resultados semelhantes foram encontrados por Bonetti et al. (2019) para a camada de 0,00-0,05 m, entretanto nas outras camadas verificaram uma redução da Mic. Entretanto, os autores trabalharam com sistema de ILP em PD de longo prazo (14 anos).

O aumento da Mic na PC1 para a camada de 0,00-0,05 m (FIGURA 6 C) teve comportamento distinto do encontrado por outros autores como Ambus et al. (2018) e Bonetti et al. (2019), que constataram a redução da Mic após a colheita. O aumento da Mic no presente estudo foi causado provavelmente pelo tráfego de máquinas agrícolas com umidade inadequada do solo no momento da colheita, conforme supracitado.

No PC2, a redução da Mic nas camadas superficiais, pode estar relacionado com o uso da haste sulcadora no momento da semeadura da cultura de verão, que proporcionou a quebra da camada superficial compactada, resultante do período do pastejo possibilitando a exploração do sistema radicular no solo, melhorando a estruturado solo (CONTE et al., 2011) (FIGURA 6 C).

FIGURA 6 - ANÁLISE SUBSUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA (A) X ANO (B) X CAMADA (C) MICROPOROSIDADE PLANTIO DIRETO.



Letras diferentes indicam diferença estatística, dentro de cada grupo de fatores; ns indica não haver diferença estatística, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

FONTE: O autor (2019).

A capacidade de campo relativa (CCR) apresentou diferença estatística para a interação Ano x Época dentro das camadas (FIGURA 7 A). Para as camadas 0,05-0,10 m no ano 2, na camada 0,10-0,15 m e 0,15-0,20 no ano 1, sendo o PC superior ao PP. Para a camada 0,05-0,10 m, PC2 obteve valor médio de CCR de $0,82 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, diferindo estatisticamente da época PP2 com $0,74 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Enquanto que, nas camadas de 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m o PC1 apresentaram respectivamente, 0,78 e $0,81 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ contra PP1 com 0,71 e $0,72 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Ocorreu variação das épocas dentro das camadas no decorrer do estudo, sendo que houve CCR maior em PC que em PP, porém somente no ano 1 e 2. Na interação Época x Camada dentro dos anos, não ocorreu diferença dos dados entre os anos em cada época e camada analisada (FIGURA 7 B).

O aumento da CCR da época PP para a PC no ano 1, pode ter sido ocasionado pelo rearranjo do espaço poroso devido ao tráfego de máquinas agrícolas durante a colheita da cultura de verão, proporcionando maior retenção de água na zona da raiz reduzindo a produção microbiana de nitrato. Os valores encontrados no presente estudo variaram de 0,68 a $0,82 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, todos os valores de estão acima da faixa ideal que varia de 0,6 a $0,7 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, para a produção microbiana de nitrato (REYNOLDS et al., 2009).

Reynolds et al. (2009) comparando solos com diferentes manejos e textura, encontraram valores de CCR variando de 0,72 a $0,86 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nos solos de textura argilosa em plantio direto, os autores associaram esse incremento com outros atributos físicos do solo com a densidade do solo, a CA e o teor de matéria orgânica que também estavam fora da faixa ideal proporcionando uma baixa qualidade física do solo e baixa resiliência estrutural do solo.

No entanto, os resultados da CCR foram significativos para a interação Época x Ano entre as camadas (FIGURA 7 C) em PP1, PC2 e PC3. Para o PP1 a camada 0,00-0,05 m apresentou maior valor médio ($0,81 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) diferindo-se da camada de 0,15-0,20 m com $0,71 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o menor valor médio. As camadas 0,05-0,10 e 0,10-0,15 apresentaram valores de $0,77 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,72 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente, não apresentando diferença entre si e nem com as demais camadas.

O aumento na camada superficial da CCR, provavelmente foi ocasionado pelo efeito do pisoteio animal, que aumentou proporcionalmente a Mic (FIGURA 5 A) associado coma baixa quantidade de matéria orgânica pode ter influenciado neste comportamento. Como constatado por Reynolds et al. (2009), que encontraram

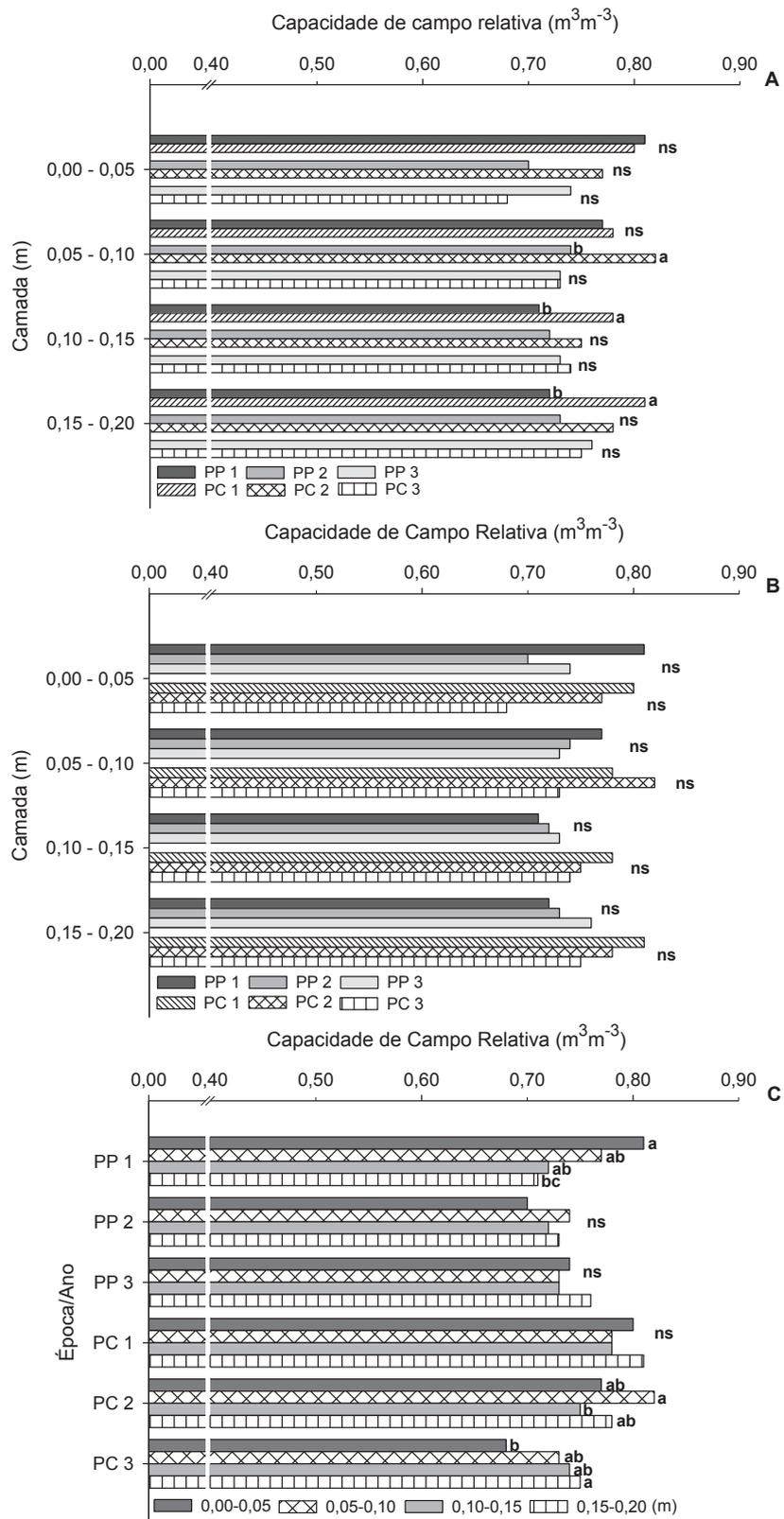
resultados semelhantes em solos com textura argilosa com baixa quantidade de matéria orgânica.

Para o PC2 o maior valor médio encontrado foi na camada 0,05-0,10 m ($0,82 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), apresentando diferença estatística da camada 0,10-0,15 m com $0,75 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Já as demais camadas 0,00-0,05 m ($0,77 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e 0,15-0,20 m ($0,78 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) não apresentaram diferença entre si e nem com as demais.

Esse comportamento pode ter sido influenciado pelo menor número de ciclos de umedecimento/secamente, já que no ano 2 teve menor precipitação associado com a baixa quantidade de matéria orgânica proporcionando menor resiliência esta camada.

No PC3, o maior valor médio encontrado foi para a camada de 0,15-0,20 m com $0,75 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto que o menor valor observado se referiu à camada 0,00-0,05 m com $0,68 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, com diferença significativa entre camadas. Já as camadas 0,05-0,0 e 0,10-0,15 m com $0,73 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,75 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente, não obtiveram diferença estatística entre si e nem com as demais camadas. A variação em profundidade pode estar associada com o curto período que a ILP esta instalada em PD, ocasionando uma variação inesperada para o PC3, já que este ano apresentou maior precipitação e por conseqüência deveria a apresentar maior valor em superfície

FIGURA 7 - ANÁLISE SUBSUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA (A) X ANO (B) X CAMADA (C) CAPACIDADE DE CAMPO RELATIVA PLANTIO DIRETO.



Letras diferentes indicam diferença estatística, dentro de cada grupo de fatores; ns indica não haver diferença estatística, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

FONTE: O autor (2019).

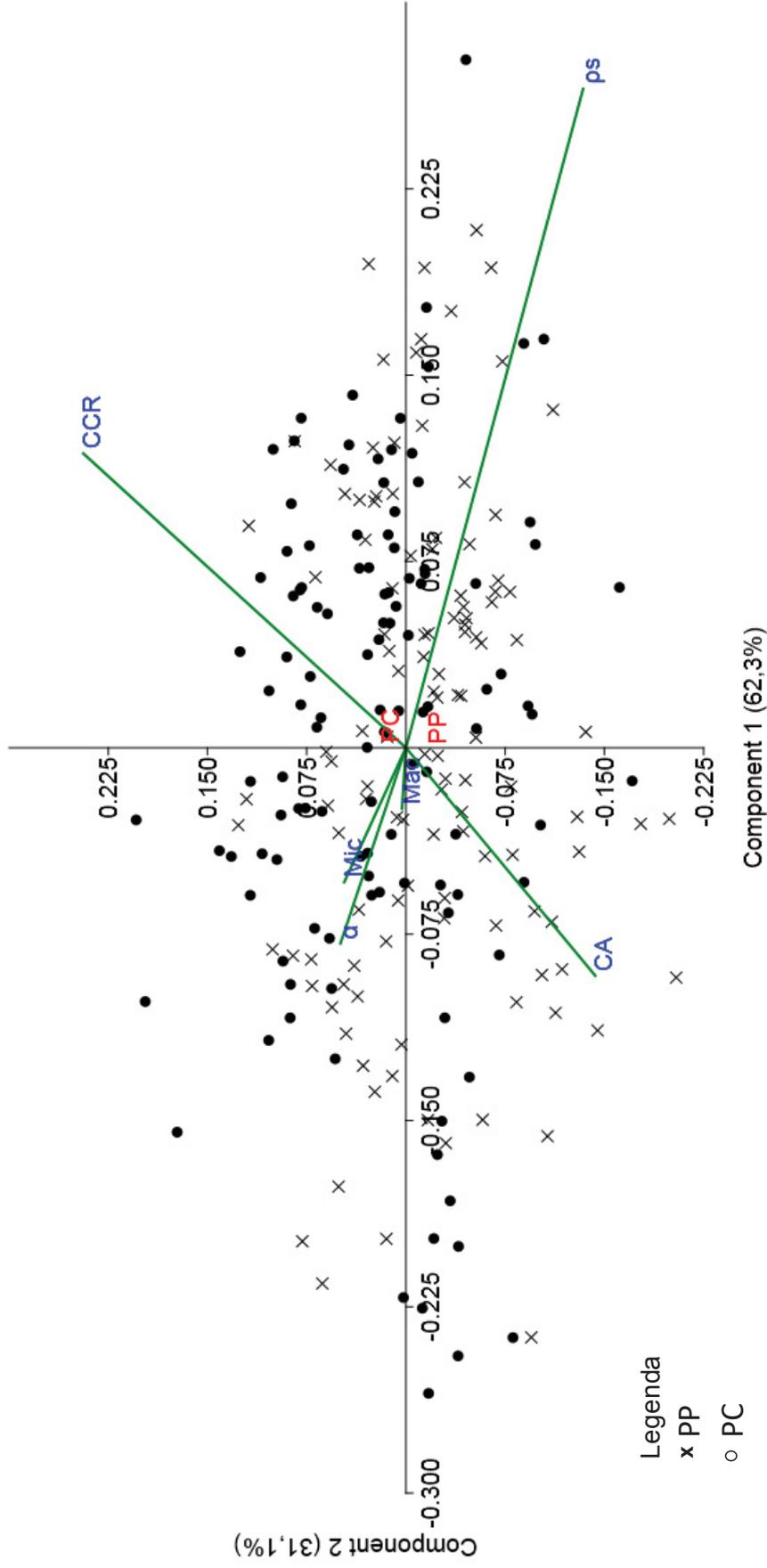
Com o intuito de facilitar o entendimento de quais atributos mais influenciaram neste preparo de solo, realizou-se a análise de componentes principais mostrou que 62,3% da variabilidade é explicada pelo componente 1, relacionado principalmente à densidade do solo (ρ_s) e 31,1% pelo componente 2, relacionado à capacidade de campo relativa (CCR) e à capacidade de aeração (CA).

Quando comparadas as épocas PC e PP (FIGURA 8) notou-se pouca diferenciação quanto à variabilidade dos dados em relação as propriedades físicas avaliados ao longo do experimento, de modo que pode-se admitir não haver grande diferença entre as épocas ao longo do tempo, pois ambas permaneceram centralizadas deslocando-se levemente em direção aos eixos da densidade (ρ_s) e da capacidade de campo relativa (CRR). Isto pode ser atribuído à sucessão ocorrida entre as épocas PP e PC, de modo que os efeitos individuais que por ventura possam ocorrer em uma época para determinado ano, passam a ser neutralizados pela época seguinte e assim por diante. Portanto, ao longo do tempo não foi detectada grande variação dos atributos avaliados na média dos dados obtidos assim tanto faz amostrar a área em uma época ou na outra.

Quando avaliados os anos (FIGURA 9), isoladamente, percebe-se que o ano 1 apresentou maior correlação com a CRR, já o ano 3 apresentou alta correlação com a (ρ_s), enquanto que o ano 2 apresentou correlação com ambos. O comportamento do ano 1 e 3 pode ser justificado pela maior precipitação deste dois anos, onde foram encontrados valores altos para a (ρ_s) e CRR resultante do pisoteio animal quando o solo estava com umidade inadequada. Já o ano 2 apresentou menor correlação com esses dois atributos provavelmente pela condição diferenciada de precipitação.

As camadas 0,00-0,05; 0,05-0,10 e 0,05-0,10 m (FIGURA 10) apresentaram maior correlação com a (ρ_s) enquanto que a profundidade 0,15-0,20 m teve maior correlação com a MIC, α e MAC. A forte correlação das camadas mais superficiais com a (ρ_s), pode ser efeito do pisoteio animal, devido o menor tamanho dos cascos dos animais a pressão exercida por eles na superfície do solo e dissipada ate 0,10 m de profundidade, bem como o tráfego de máquinas agrícolas no momento da colheita da cultura de verão com umidade do solo inadequada, pode ter ocasionado o deslocamento dessas profundidades para o quadrante da (ρ_s).

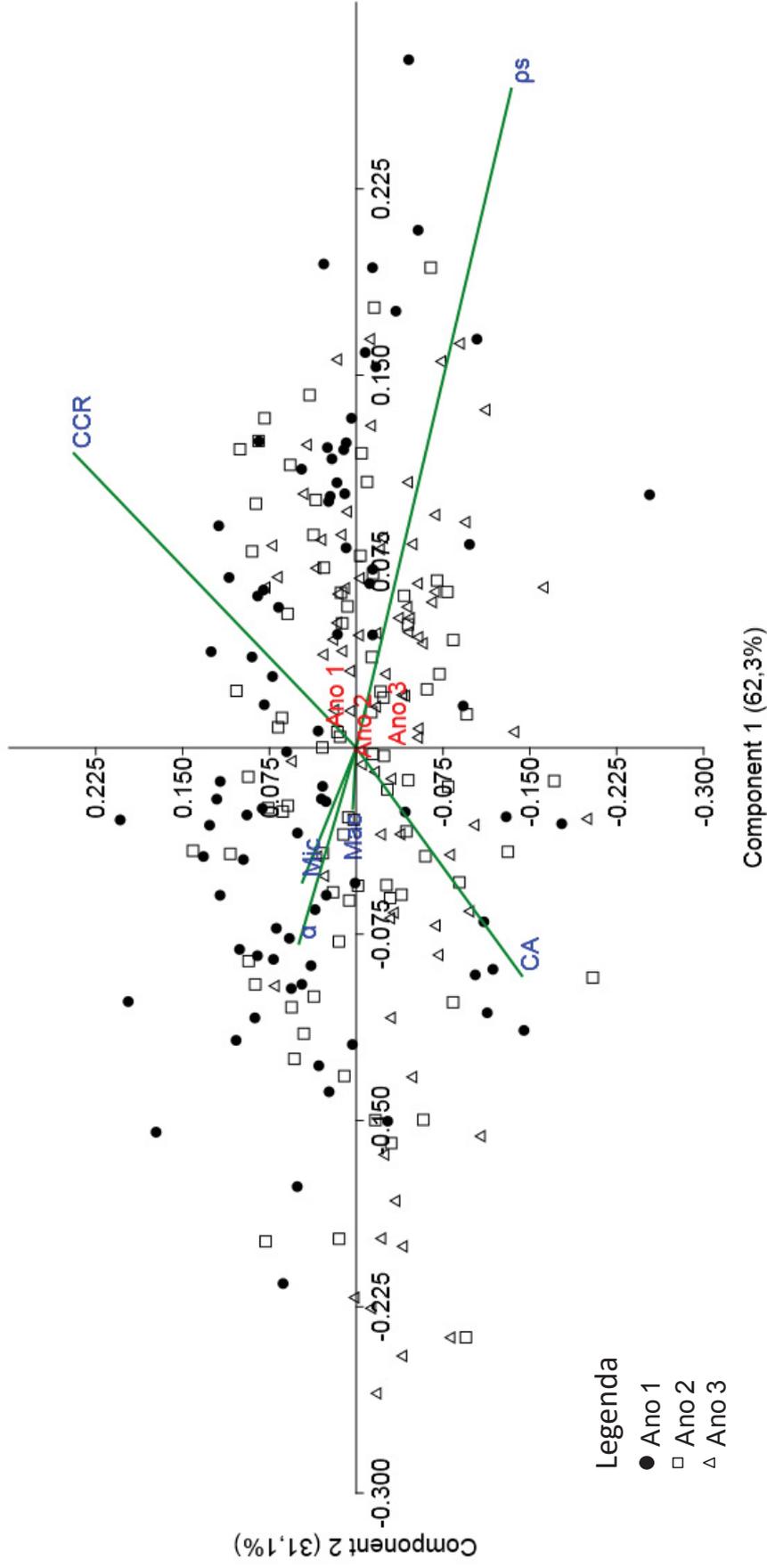
FIGURA 8 – ANÁLISE MULTIVARIADA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS COM AS ÉPOCAS NA AREA DE PLANTIO DIRETO.



Legenda
x PP
o PC

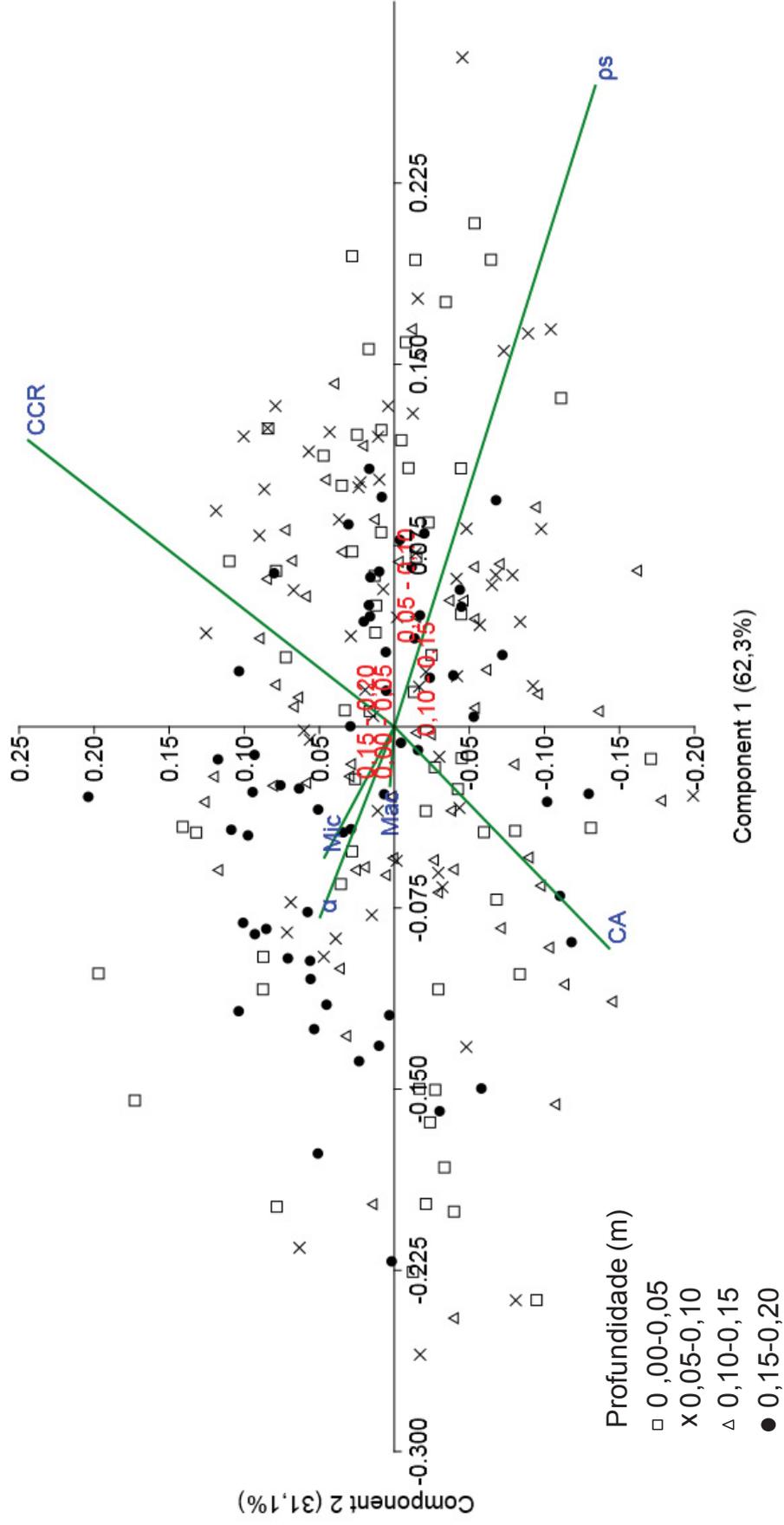
FONTE: O autor (2019).

FIGURA 9 – ANÁLISE MULTIVARIADA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS COM OS ANOS NA AREA DE PLANTIO DIRETO.



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 10 - ANÁLISE MULTIVARIADA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS COM AS PROFUNDIDADES NA AREA DE PLANTIO DIRETO.



FONTE: O autor (2019).

3.2 CULTIVO MÍNIMO (CM)

A variação espacial das propriedades físicas do solo, analisada na linha e entrelinha da cultura, no PC para o CM também não foi constatada. Contudo, no CM, observou-se que a ρ_s apresentou interação dupla para Ano e camada, CA entre época e ano e também entre época e camada e a CCR entre época X ano e época X camada. Enquanto que, os atributos Mic e Mac apresentaram tripla interação entre as fontes de variação época, ano e camada. Não foi observado valor significativo de F para as fontes de variação isoladamente, e a porosidade total não foi significativa (TABELA 6).

TABELA 6 - RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO NO CULTIVO MÍNIMO.

Fonte de variação	Propriedades Físicas					
	ρ_s	α	Mic	Mac	CA	CCR
Época						
Ano						
Camada						
Época X Ano					*	*
Ano X Camada	*					
Época X Camada					*	*
Época X Ano X Camada			*	*		
CV (%)	13,80	42,60	6,40	19,19	30,20	8,99
F	2,35		4,34	6,12	10,80	13,86
					10,75	11,72

ρ_s : Densidade do solo (g cm^{-3}); α : Porosidade total (m^3m^{-3}); Mic: Microporosidade (m^3m^{-3}); Mac: Macroporosidade (m^3m^{-3}); CA: Capacidade de aeração (m^3m^{-3}); CCR: Capacidade de campo relativa (m^3m^{-3}), CV: coeficiente de variação. *: níveis de significância pelo teste F a $p < 0,05$, e ausência do mesmo: não significativo.

FONTE: O autor (2019).

No desdobramento dos anos em cada camada, para a ρ_s (TABELA 7), verificou-se para a camada de 0,05-0,10 m o maior valor médio de ρ_s no ano 1 (1,26 g cm^{-3}) diferindo dos demais anos. Similarmente, a camada 0,10-0,15 m, no ano 1 apresentou a maior ρ_s , contudo não diferindo do ano 2. Em geral, o aumento da densidade ocorreu nas camadas intermediárias, da profundidade de 0,05-0,15 m apenas no ano 1.

Já no desdobramento das camadas para cada ano, foi constatada diferença entre camadas para a ρ_s somente no ano 1 com menor valor médio de ρ_s na camada de 0,00-0,05 m, sendo que nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,15 m ocorreram os maiores valores (1,26 g cm^{-3} , para ambas), já a camada 0,15-0,20 m (1,20 g cm^{-3})

não apresentou diferença estatística em relação às demais camadas. Nos anos 2 e 3 não houve diferença estatística para a ρ_s entre as camadas.

TABELA 7 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ANO X CAMADA PARA A DENSIDADE DO SOLO NO CULTIVO MÍNIMO.

Ano	ρ_s (g cm ⁻³)			
	Camada (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20
1	1,14 aB	1,26 aA	1,26 aA	1,20 aAB
2	1,19 aA	1,18 bA	1,20 abA	1,19 aA
3	1,15 aA	1,19 bA	1,19 bA	1,21 aA

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas comparam médias dos anos (coluna); Letras maiúsculas comparam médias das camadas (linha).

FONTE: O autor (2019).

Os maiores valores de ρ_s observados nas camadas 0,05-0,10 e 0,10-0,15 m do ano 1 (1,26 g cm⁻³), estão relacionado à maior precipitação no ano (fenômeno El Niño), que, associada ao efeito do uso da grade na desagregação do solo, e ao pisoteio animal, potencializaram a aumento da ρ_s nessas camadas. Resultados semelhantes foram encontrados por Schjønning e Thomsen (2013) em um solo revolvido com grade até 0,10 m, onde verificaram maior ρ_s nas camadas abaixo da camada revolvida.

Por outro lado, um menor valor de ρ_s foi observado na camada de 0,00-0,05 m (TABELA 7) (1,14 g cm⁻³), que pode ser atribuído ao maior teor de matéria orgânica presente nesta camada e ao manejo da altura da pastagem, uma vez que a retirada dos animais se dá quando a pastagem atinge 15 cm de altura (TABELA 1). Zhang, Horn e Hallett (2005) destacaram que a resiliência do solo pode ser significativamente maior com o aumento da matéria orgânica devido as ligações entre as partículas, melhorando estrutura do solo.

Outro fator que pode estar relacionado à menor ρ_s na camada 0,00-0,05 m (1,14 g cm⁻³) é o maior intervalo entre a retirada dos animais e a dessecação da pastagem, uma vez que neste período a pastagem continua a emitir raízes e folhas, melhorando a estrutura do solo, além de aumentar a fitomassa remanescente da pastagem (VEIGA et al., 2012). O aumento da palhada remanescente do pastejo auxilia na dissipação da pressão exercida pelo tráfego de máquinas e animais, devido à baixa densidade associada à esses resíduos e a susceptibilidade à deformação e elasticidade (BRAIDA et al., 2006).

Na TABELA 8, o desdobramento das épocas para cada ano para a CA, mostrou que nos anos 2 e 3 houve diferença significativa entre as épocas PP e PC. Para o ano 2, o PP obteve maior valor médio de CA que o PC, enquanto que no ano 3 ocorreu o inverso. O aumento da CA, época PP no ano 2 pode ser explicado pela menor precipitação que este ano apresentou durante o período de pastejo, aumentando o CA do solo.

Já no desdobramento dos anos dentro de cada época, obteve-se variação para a época PP com os maiores valores encontrados nos anos 2 e 3. Enquanto que para o PC somente no ano 3 que houve aumento da CA. Os menores valores de CA foram observados para o ano 1, em ambas as épocas (TABELA 8). A CA está relacionada com a umidade do solo, sendo que o aumento do conteúdo de água do solo propicia a redução da quantidade de poros ocupados por ar (MENTGES et al 2016). Logo, a ocorrência de alta precipitação no ano 1, gerada pelo El Niño, influenciou nesta diferença entre os anos. Comportamento semelhante foi observado por Castellini et al. (2013), que constataram menor CA quando o solo apresenta umidade elevada.

Segundo Reynolds et al. (2009) o valor mínimo de CA $\geq 0,10\text{m}^3\text{m}^{-3}$ e o valor ideal para o desenvolvimento e produção das culturas sem perdas deve ser $\geq 0,14\text{m}^3\text{m}^{-3}$, portanto, nesta avaliação, todos os valores estão acima do valor ideal. Nascimento et al. (2018) avaliando dois sistemas integrados (ILP e ILPF) também encontraram valores adequados de CA, para solo com textura arenosa.

TABELA 8 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA X ANO PARA A CAPACIDADE DE AERAÇÃO CULTIVO MÍNIMO.

Época	Capacidade de aeração (m^3m^{-3})		
	Ano		
	1	2	3
PP	0,10 aB	0,15 aA	0,13 bA
PC	0,10 aB	0,12 bB	0,17 aA

PP: Pós-Pastejo; PC: Pós-Colheita. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas comparam médias das épocas (coluna); Letras maiúsculas comparam médias dos anos (linha).

FONTE: O autor (2019).

A CA também apresentou interação dupla entre época e camada (TABELA 9). O PP foi menor em relação ao PC na camada de 0,00-0,05 m, não diferindo nas demais camadas.

Em relação ao desdobramento das camadas para cada época, no PP não houve diferença entre as camadas. Por outro lado, em PC a camada de 0,00-0,05 m apresentou maior CA média em comparação às demais (TABELA 9).

Para esta variável a redução/aumento em PP/PC não aponta para um comportamento estável, contudo em ambas épocas a CA aumentou no decorrer de três anos.

TABELA 9 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA X CAMADA PARA A CAPACIDADE DE AERAÇÃO CULTIVO MÍNIMO.

Época	Capacidade de aeração ($m^3 m^{-3}$)			
	Camada (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20
PP	0,12 bA	0,13 aA	0,12 aA	0,12 aA
PC	0,18 aA	0,12 aB	0,12 aB	0,10 aB

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas comparam médias das épocas (coluna); Letras maiúsculas comparam médias das camadas (linha).

FONTE: O autor (2019).

A capacidade de campo relativa (CCR) apresentou diferença significativa no desdobramento das épocas para os anos 2 e 3 (TABELA 10). No ano 2 o maior valor médio encontrado foi em PC diferindo de PP. Já no ano 3 ocorreu o inverso, a CCR foi maior em PP em relação ao PC. Possivelmente esse acréscimo devido a maior precipitação que o ano 3 apresentou, durante o período do pastejo do aumentando o CCR.

Os valores encontrados para a CCR tiveram grande variação e não mostraram estabilidade entre as épocas. Todos os valores encontrados de CCR estão acima de $0,7 m^3 m^{-3}$ faixa ideal.

No desdobramento dos anos para cada época verificou-se que na época PP houve diferença significativa entre os anos, onde o ano 1 foi maior diferindo-se do ano 2, enquanto o ano 3 não diferiu estatisticamente dos demais, indicando certa estabilidade no tempo. Já no PC o maior valor médio de CCR encontrado foi no ano 1, reduzindo-se estatisticamente a cada ano.

TABELA 10 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA X ANO PARA A CAPACIDADE DE CAMPO RELATIVA CULTIVO MÍNIMO.

Época	Capacidade de campo relativa ($m^3 m^{-3}$)		
	Ano		
	1	2	3
PP	0,79 aA	0,73 bB	0,76 aAB
PC	0,82 aA	0,77 aB	0,70 bC

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas comparam médias das épocas (coluna); Letras maiúsculas comparam médias dos anos (linha).

FONTE: O autor (2019).

A variação das épocas para o ano 3 pode ser explicada pela maior precipitação que ocorreu neste ano associado com o pisoteio animal, ocasionando um rearranjo do espaço poroso, diminuindo a aeração a conseqüentemente aumento o valor do CCR. Já o ano 2 apresentou comportamento inesperado. Analisando as épocas isoladamente o longo dos anos percebe-se eu tanto para a época PP quanto para a PC os maiores valores encontrados foi no ano 1, que pode também ser justificado pela maior precipitação associado ao pisoteio animal na PP e ao tráfego de máquinas na PC quando o solo estava com umidade inadequada.

Castellini et al. (2014), em um solo de textura franco-argilosa, constatou variação da CCR entre diferentes épocas, entretanto dos os valores encontrados estão dentro da faixa ideal de 0,6 a 0,7 $m^3 m^{-3}$.

Foi constatada a diferença significativa no desdobramento das épocas para a CCR somente na camada 0,00-0,05 m, sendo maior em PP (TABELA 11). No desdobramento das camadas para cada época, PP não apresentou diferença estatística, já em PC a CCR foi menor na camada de 0,00-0,05 m.

Praticamente todos os valores encontrados estão acima da faixa ideal que varia de 0,6 a 0,7 $m^3 m^{-3}$. Quando a CCR esta acima de 0,7 $m^3 m^{-3}$ existe um excesso de água e escassez de aeração na zona da raiz prejudicando a produção microbiana de nitrato para a planta.

Percebe-se que houve uma variação temporal de CCR, entretanto para a maior parte das camadas houve um aumento da CCR na época PC, comportamento semelhante foi encontrado por Castellini et al. (2014), onde verificou variação entre as épocas e a principal causa foi a umidade do solo, entretanto os valores encontrados estão dentro da faixa de 0,6 a 0,7 $m^3 m^{-3}$.

Observou-se que na camada de 0,00-0,05 m houve diferença entre as épocas, com uma redução da época PP para a época PC, isto é houve uma melhora

em superfície, podendo associar essa melhora ao teor de COT, associado ao aporte de matéria orgânica, que nesta camada foi elevado, facilitando a recuperação do solo.

Comparando diferentes sistemas de manejos em um solo franco arenoso, Nascimento et al. (2018) constataram variação nos valores e CCR em profundidade, não obedecendo uma ordem, mas variando de 0,60 a 0,68 m³ m⁻³, portanto, dentro da faixa ideal.

TABELA 11 - ANÁLISE SUB-SUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA X CAMADA PARA A CAPACIDADE DE CAMPO RELATIVA CULTIVO MÍNIMO.

Época	Capacidade de campo relativa (m ³ m ⁻³)			
	Camada (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20
PP	0,76 aA	0,75 aA	0,76 aA	0,77 aA
PC	0,69 bB	0,78 aA	0,78 aA	0,80 aA

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey; Letras minúsculas comparam médias das épocas (coluna); Letras maiúsculas comparam médias das camadas (linha).

FONTE: O autor (2019).

No desdobramento da interação Ano x Época dentro de cada camada para a Mic (FIGURA 11 A), verificou-se diferença estatística apenas para o ano 1 e 3 nas camadas subsuperficiais. No ano 1, PC e PP, na camada 0,15-0,20 m, diferiram significativamente com valores médios de Mic de 0,45 e 0,39 m³ m⁻³, respectivamente. Contudo, no ano 3 a diferença encontrada foi na camada de 0,10-0,15 m, com valores médios de Mic de 0,41 e 0,45 m³ m⁻³, respectivamente para PC e PP.

A maior variação em decorrência da maior profundidade pode ser justificada pelo tráfego de máquinas agrícolas durante a colheita quando o solo estava com umidade inadequada, propiciando que as camadas subsuperficiais fossem atingidas, pois se encontravam susceptíveis à processos de desagregação, possivelmente ocasionados pela grade, o que potencializou o aumento da Mic na época PC.

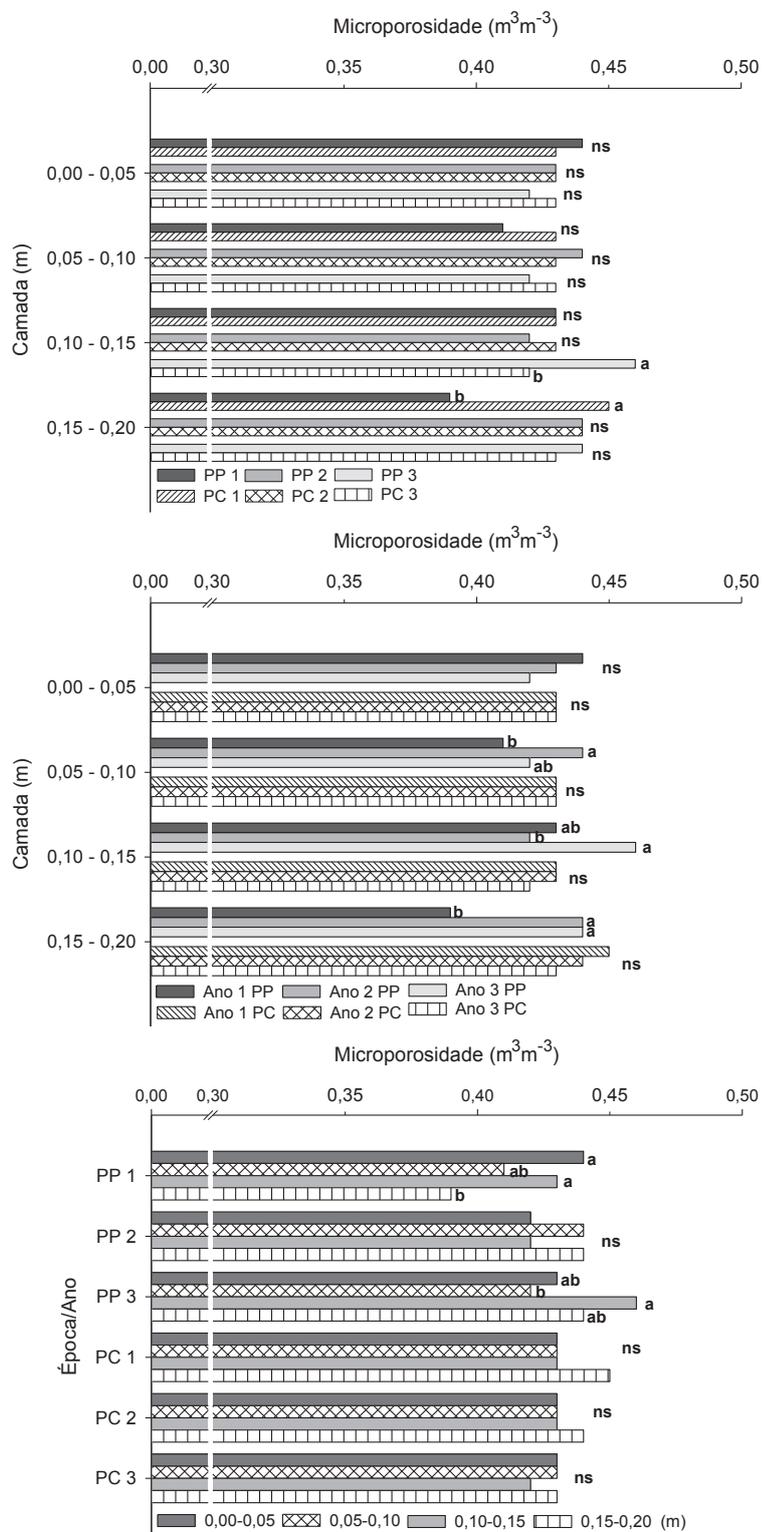
No desdobramento da interação Época x Camada para os diferentes anos (FIGURA 11 B), não houve diferença significativa para a época PC. No entanto em PP, nas camadas de 0,05-0,10 e 0,15-0,20 m, o ano 2 foi significativamente superior ao ano 1, mas não diferiu do ano 3. Os resultados da camada de 0,10-0,15, se

comportaram diferentemente, incrementando a Mic no ano 3, diferindo-se do ano 2 com $0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Para o desdobramento da interação Ano x Época nas diferentes camadas (FIGURA 11 C), houve diferença estatística apenas para PP, com o menor valor médio de Mic em PP1 na camada de 0,15-0,20 m e, em PP3 na camada de 0,05-0,10 m ($0,39$ e $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente). Houve um incremento da Mic quando comparada às camadas, na época PP, na profundidade de 0,00-0,05, onde teve a desagregação do solo pela grade no ano 1. Diante disso, pode-se afirmar que houve influência do pisoteio animal, o qual foi intensificado porque o solo está com elevada umidade e desagregado pelo uso da grade.

Esta variável indica ser mais estável ao longo de três anos entre as épocas. Contudo, variações ocorreram entre os anos para o PP, o que não foi constatado em PC. Já a Mic apresentou variação entre as épocas para as camadas subsuperficiais (0,10-0,15 e 0,15-0,20 m) para os anos 1 e 3. Contudo, variações ocorreram entre os anos e camadas para o PP, o que não foi constatado em PC e quando avaliados os anos o comportamento seguiu uma ordem.

FIGURA 11 - ANÁLISE SUBSUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA (A) X ANO (B) X CAMADA (C) MICROPOROSIDADE CULTIVO MÍNIMO.



Letras diferentes indicam diferença estatística, dentro de cada grupo de fatores; ns indica não haver diferença estatística, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

FONTE: O autor (2019).

Observou-se no desdobramento da interação Ano x Época, para a Mac, nas diferentes camadas (FIGURA 12 A) diferença significativa nos anos 1 e 3. Para o ano 1, a Mac foi maior no PC ($0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) na camada de 0,00-0,05 m e, na camada de 0,15-0,20 m foi o PP que obteve o maior valor médio ($0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). No ano 3, o PC obteve Mac superior no PC somente nas camadas subsuperficiais, com valores médios de 0,14 e $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente para as camadas de 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m, nesta última camada o valor médio de Mac foi de $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em PP.

A Mac apresentou variação entre as épocas, sendo que a menor foi verificada na Mac camada de 0,00-0,05 m para a PP no ano 1, possivelmente por consequência do pisoteio animal e da umidade inadequada do solo, já nas camadas subsuperficial 0,10-0,15 m para ano 3, pode ser atribuída ao uso da grade que desagregou o solo, associado a umidade inadequada ocasionou um novo rearranjo das partículas, reduzindo a Mac no PP, entretanto na camada de 0,15-0,20 m obteve-se um comportamento diferente entre as épocas, sendo que a época PP apresentou maior macroporosidade do solo enquanto que na época PC houve redução

Porém, para a maior parte das camadas que tiveram variação, ocorreu um incremento da Mac, isto é, o solo se recuperou do estresse sofrido na época PP, resultados semelhantes foram encontrados por Ambus et al. (2018) que encontraram variação de $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ da época após o pastejo e após a colheita para a camada de 0,00-0,05 m já Bonetti et al (2019) encontrou uma variação de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ entre uma época para outra.

Gregory et al. (2009) comprovaram que ciclos de umedecimento/secamento e congelamento/descogelamento aumentam os espaços vazios preenchidos por ar, melhorando a estrutura do solo e criando poros de tamanho superior a $60\mu\text{m}$ que são conhecidos como macroporos.

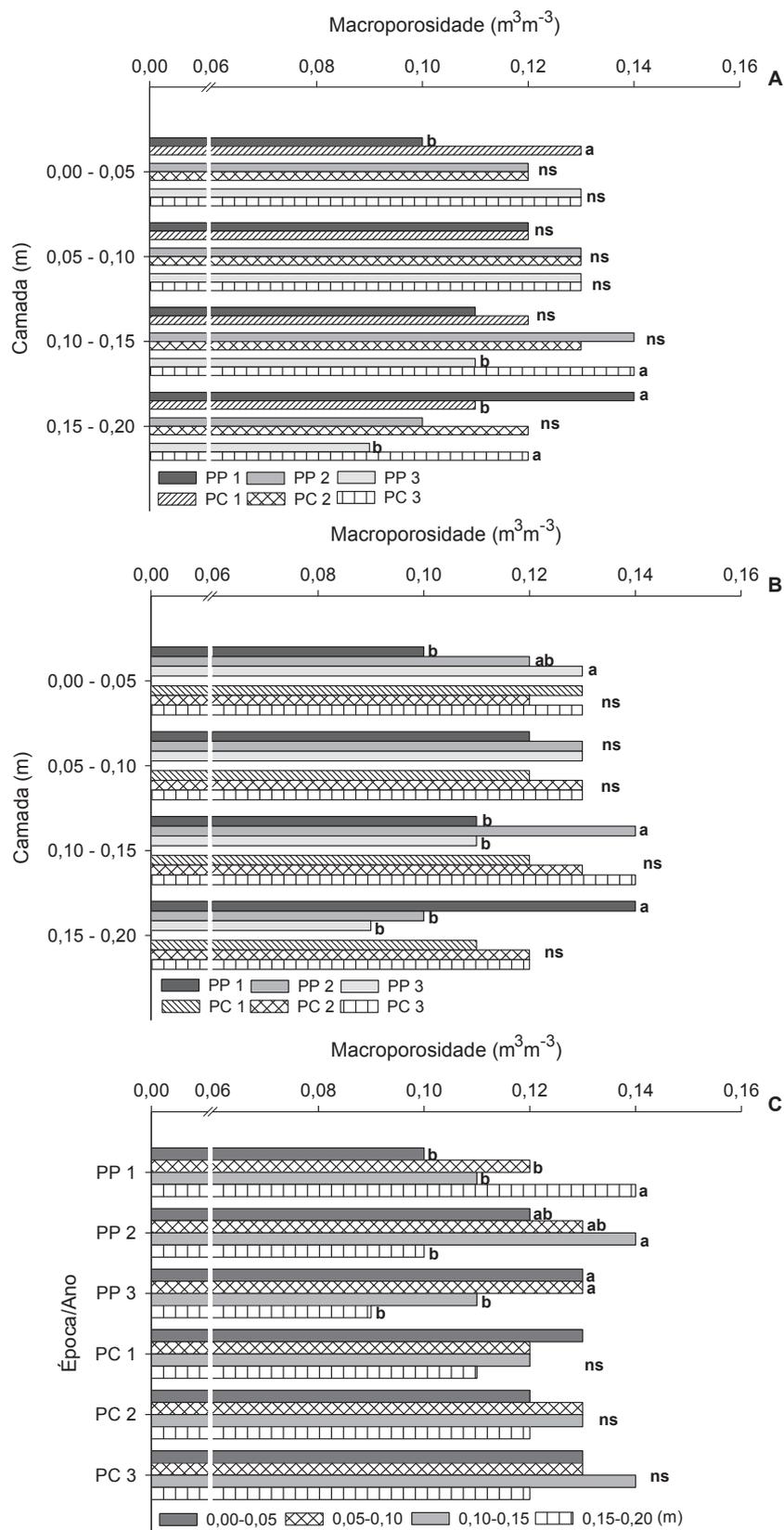
Analisando o desdobramento da interação Época x Camada (FIGURA 12 B) apenas o PP, nas camadas 0,00-0,05, 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m diferiram entre os anos. O ano 1 foi o que proporcionou os menores valores médios de Mac nas camadas de 0,00-0,05 e 0,10-0,15, com exceção da camada de 0,15-0,20 m ($0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), que foi superior aos demais anos. Resultado similar ocorreu no ano 2, nas camadas de 0,00-0,05 e 0,15-0,20 m, exceto a camada 0,10-0,15 m na qual apresentou o maior valor médio de Mac ($0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

A variação entre os anos não obedeceu a um padrão, sendo que para cada época PP o comportamento dos anos foi diferente. Para as camadas de 0,00-0,05 m e 0,10-0,15 m, os anos com maior precipitação (ano 1 e 3) tiveram menor Mac (0,10 e 0,11 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente), possivelmente devido ao uso da grade e do intenso pisoteio animal. Porém, na profundidade de 0,15-0,20 m no PP1 apresentou maior Mac (0,14 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) quando comparado como ano 2 e 3 (0,10 e 0,09 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

Houve diferença estatística entre a interação Época x Ano nas diferentes camadas (FIGURA 12 C). Novamente, não houve diferenças para PC, apenas para PP nos anos 1, 2 e 3. A Mac foi superior em superfície a exceção do ano 1, na qual a camada 0,15-20 m obteve o maior valor médio de (0,14 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), diferindo-se das demais camadas. De forma geral ao final de três anos, a Mac reduziu ou não se alterou, aumentando somente na camada de 0,00-0,05 m no PP, entretanto se manteve estável e em valores superiores a 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ no PC.

A variação em profundidade da Mac para PP1, PP2 e PP3 pode ser influência do uso da grade uma vez que para o PP1 e PP3 houve um aumento e redução da Mac para as camadas subsuperficiais e para o PP2 ocorreu um aumento em profundidade. Adicionalmente, verificou-se que ao final de três anos, a Mac reduziu ou não se alterou, aumentando somente na camada de 0,00-0,05 m no PP, entretanto se manteve estável e em valores superiores a 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ no PC.

FIGURA 12 - ANÁLISE SUBSUBDIVIDIDA ENTRE ÉPOCA (A) X ANO (B) X CAMADA (C) MACROPOROSIDADE CULTIVO MÍNIMO.



Letras diferentes indicam diferença estatística, dentro de cada grupo de fatores; ns indica não haver diferença estatística, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

FONTE: O autor (2019).

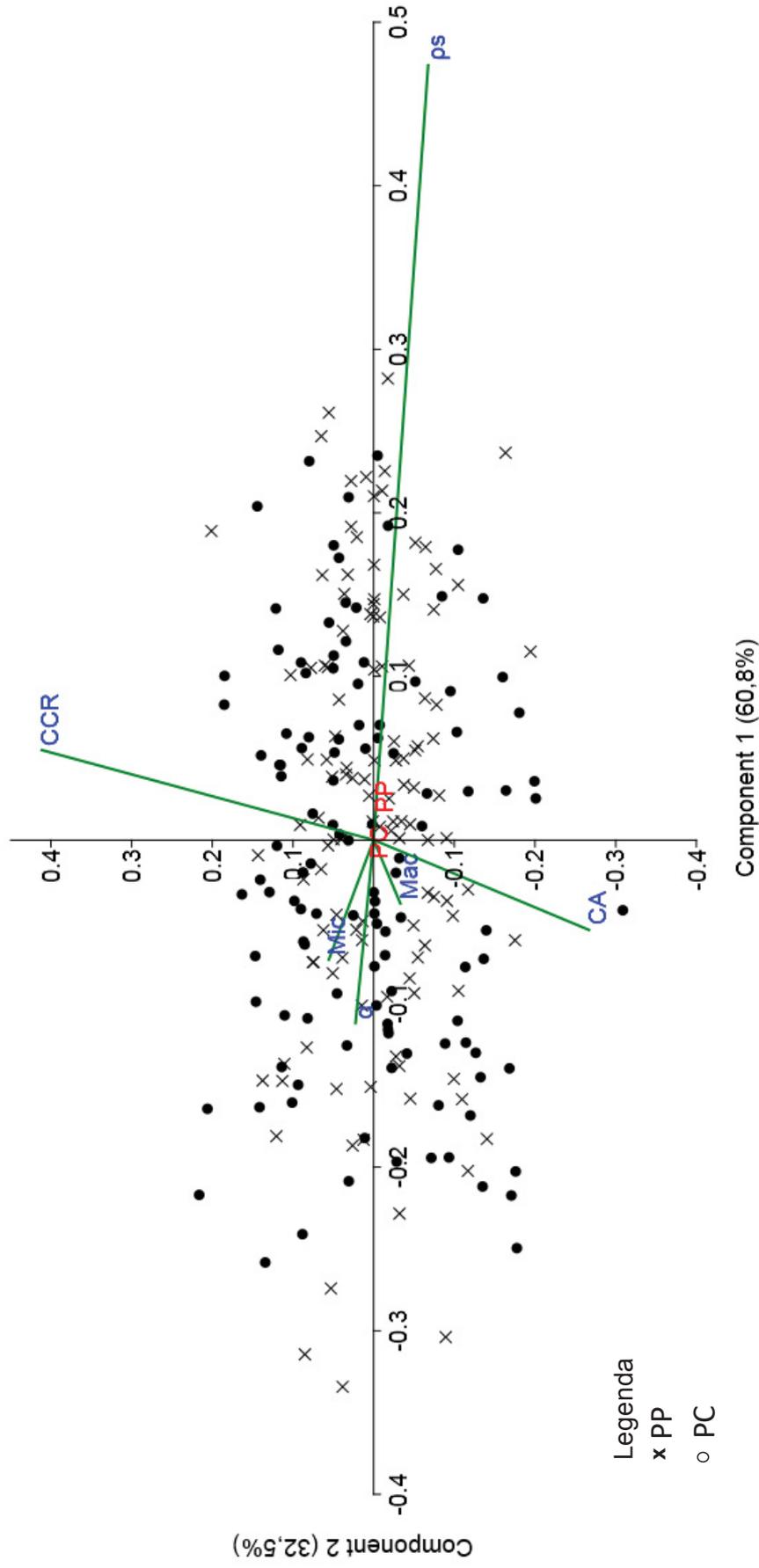
A análise de componentes principais para o CM mostrou que 60,8% da variabilidade é explicada pelo componente 1, relacionado com os atributos (ρ_s) e opostamente a (Mac) e microporosidade (Mic) e a porosidade total (α); e 32,5% pelo componente 2, relacionados à capacidade de campo relativa (CCR) oposta à capacidade de aeração (CA), para o sistema de cultivo mínimo.

Quando comparada somente as épocas PC e PP (FIGURA 13), pode-se dizer que houve pouca variação dos dados ao longo dos três anos de coleta, uma vez que ambas estão centralizadas e a PP está relativamente deslocada para o eixo da ρ_s . Isto pode ser atribuído aos maiores valores ρ_s encontrados nesta época, como consequência do pisoteio animal.

Quando avaliados os anos (FIGURA 14) isoladamente, observou-se que o ano 1 se deslocou para a direita tendo alta correlação com a ρ_s e com a CCR, já o ano 2 e 3 ficaram mais centralizados e com baixa correlação com a CA e a densidade do solo. Este fato pode ser justificado pela maior precipitação no ano 1 que alterou os atributos físicos do solo, entre eles aumento da ρ_s , fazendo com que o ano 1 tivesse maior correlação com a ρ_s .

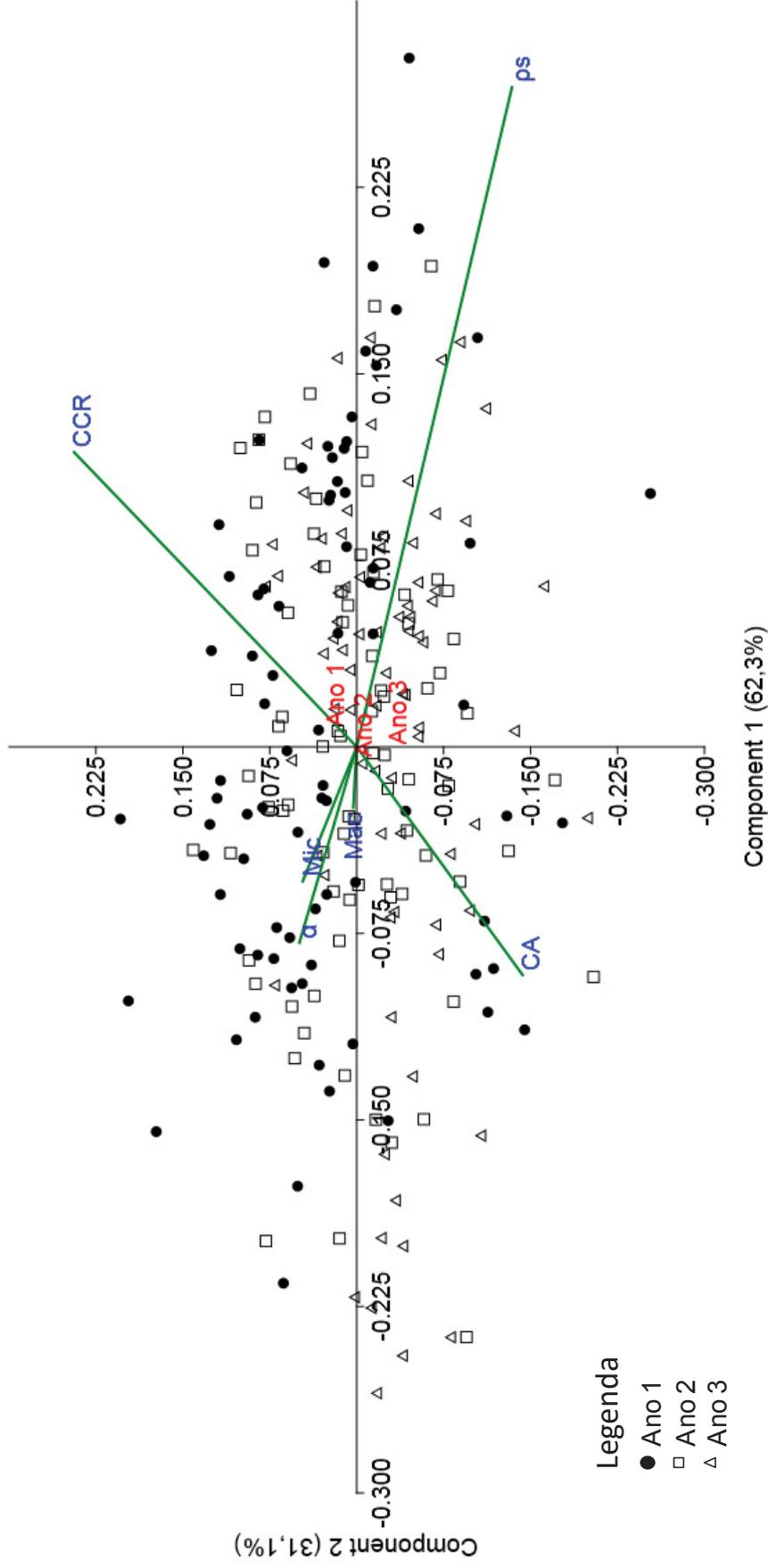
Com relação às profundidades (FIGURA 15), as camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,15 m se deslocaram para a direita apresentando maior correlação com a ρ_s e a 0,15-0,20 m ficou mais centralizada no meio dos eixos tendo maior correlação com a Mac, Mic e α . A maior correlação das camadas superficiais do solo com a ρ_s pode ser justificada pelo pastejo em umidade inadequada, já para a camada de 0,10-0,15 m pode ser efeito do uso da grade, que forma uma camada mais compactada logo abaixo da faixa de atuação do implemento.

FIGURA 13 – ANÁLISE DE MULTIVARIADA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS COM A ÉPOCA PARA O CULTIVO MINIMO.



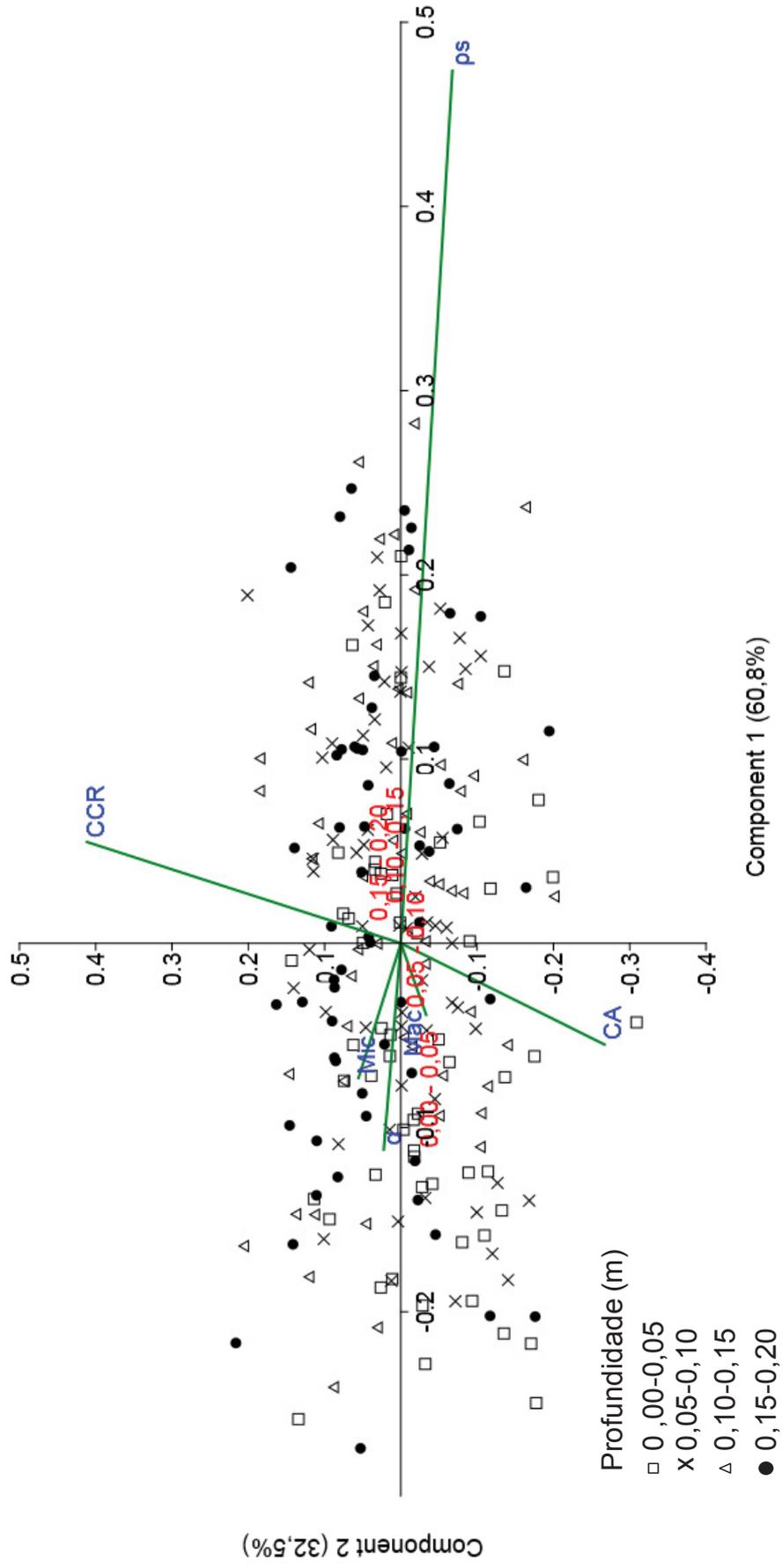
FONTE: O autor (2019).

FIGURA 14 – ANÁLISE DE MULTIVARIADA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS COM ANO PARA O CULTIVO MINIMO.



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 15 - ANÁLISE DE MULTIVARIADA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS COM PROFUNDIDADE PARA O CULTIVO MINIMO.



FONTE: O autor (2019).

De uma forma geral verificou-se uma maior variação entre as propriedades físicas do solo tanto entre épocas quanto entre anos (1 e 3), possivelmente em função da maior precipitação, e conseqüentemente, devido à predominância de ciclos de umedecimento/secamento que tornaram o solo mais resiliente em relação ao ano 2. Ao longo dos três anos de coleta foi possível observar que alguns atributos físicos do solo sob sistema de PD mostraram comportamento distinto do observado na literatura. Isso pode ser explicado pelo pouco tempo de implantação do ILP em PD no presente estudo, que foi iniciado em 2011 e ainda não está consolidado, sendo assim, mais susceptível à variação dos teores de umidade no solo em função da precipitação.

Já para o CM, foi possível perceber uma melhora para a maior parte dos atributos na época PC, podendo-se afirmar que o solo foi resiliente e que essas alterações não foram diretamente dependentes dos anos com maior precipitação. Isso pode ser justificado pelo maior tempo de adoção da ILP neste sistema (desde 2002), o que confere à esta área maior estabilidade física e maior capacidade de se recuperar dos distúrbios causados pelo preparo do solo.

Neste sentido, retoma-se a ideia inicial deste trabalho, em que se afirmou que o uso sustentável do solo pode promover aumentos substanciais na produtividade dos sistemas agrícolas, particularmente no que se refere à crescente demanda mundial por alimentos. Sob esta perspectiva, observamos que o sistema ILP pode trazer inúmeros benefícios ao solo e aos seus atributos físicos, desde que seja bem manejado e conduzido ao longo dos anos, permitindo sua consolidação.

4 CONCLUSÕES

Verificou-se variação temporal das propriedades físicas do solo em ILP nos diferentes preparos, entretanto essa variação teve intensidades diferentes para cada propriedade física do solo avaliada. Não foi verificada variação espacial dos atributos na linha e entrelinha.

No PD houve variação temporal das propriedades físicas do solo, da época PP para a PC, principalmente nas camadas superficiais do solo (0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m), como um possível efeito da alta intensidade de pastejo associado à elevada umidade do solo.

No CM, a variação temporal das propriedades físicas do solo foi mais evidente nas camadas de 0,05-0,10; 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m, possivelmente pelo uso da grade niveladora no momento da semeadura da pastagem e em função do pisoteio animal associado à elevada umidade.

Em ambos os manejos, observou-se uma melhora das propriedades físicas do solo da época PP para a época PC, nos anos com maior precipitação (ano 1 e 3), possivelmente como efeito de ciclos de umedecimento/secamento do solo.

REFERÊNCIAS

- AKSAKAL, E. L.; BARIK, K.; ANGIN, I.; SARI, S.; ISLAM, K. R. Spatio-temporal variability in physical properties of different textured soils under similar management and semi-arid climatic conditions. **Catena**. v. 172, p. 528-546, 2019.
- ALVAREZ, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. v. 6, p. 711-728, 2013.
- AMBUS, J. V.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; CARVALHO, P. C. F. Changes in composition and functional soil properties in long-term no-till integrated crop-livestock system. **Geoderma**. v. 330, p. 232-243, 2018.
- ANDREOLLA, V. R. M.; MORAES, A.; FILHO, A. B.; CARDOSO, D. L.; OLIVEIRA, E. B.; BONINI, A. K. Pestejo e adubação nitrogenada sobre os atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Engenharia Agrícola** v. 35, n.6, p. 1019-1031, 2015.
- BALBINOT JR, A. A.; MORAIS, A.; VEIGA, M.; PELISSARI, A.; DIECKOW, J. Integração lavoura pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**. v. 39, n. 6, p. 2340-2346, 2009.
- BAVOSO, M. A.; SILVA, A. P.; FIGUEREDO, G. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B. Resiliência física de dois Latossolos Vermelhos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 36, n. 6, p. 1892-1904, 2012.
- BETIOL JR, E.; TORMENA, C. A.; MOREIRA, W. H.; BALL, B.C.; FIGUEIREDO, G. C.; SILVA, A.P.D.; GIAROLA, N. F. B. Aeration condition of a clayey Oxisol under long-term no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do solo**. v. 38, n. 3, p. 990-999, 2014.
- BONETTI, J. A.; ANGHINONI, I.; GUBIANI, P. I.; CECAGNO, D.; MORAES, M. T. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. **Soil & Tillage Research**. v. 186, p. 280-291, 2019.
- BONETTI, J. A.; ANGHINONI, I.; MORAES, M. T.; FINK, J. R. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. **Soil & Tillage Research**. v. 174, p. 104-112, 2017.
- 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**. v. 30, n.4, p. 605-614, 2006.
- CARASSAI, I. J.; CARVALHO, P. C. F.; CARDOSO, R. R.; FLORES, J. P. C.; ANGHINONI, I.; NABINGER, C.; FREITAS, F. K.; MACARI, S.; TREIN, C. R. Atributos físicos do solo sob intensidades de pastejo e métodos de pastoreio com

cordeiros em integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 46, n.10, p. 1284-1290, 2011.

CASTELLINI, M.; NIEDDA, M.; PIRASTRU, M.; VENTRELLA D. Temporal changes of soil physical quality under two residue management systems. **Soil use management**. v. 30, p. 423-434, 2014.

CASTELLINI, M.; PIRASTRU, M.; NIEDDA, M.; VENTRELLA, D. Comparing physical quality of tilled and no-tilled soils in an almond orchard in southern Italy. **Italian Journal of Agronomy**. v. 8, p. 149-157, 2013.

CONTE, O.; FLORES, J. P. C.; CASSOL, L. C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; LEVIEN, R.; WESP, C. L. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 46, n.10, p. 1301-1309, 2011.

DO NASCIMENTO, D. M.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; DA SILVA, A. H.; FAVARETTO, N.; PARRON, L. M. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. **Soil and Tillage Research**. v. 186, p. 292-299, 2019.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2º ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos; 2017.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5º Ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos; 2018.

FERREIRA, C. J. B.; TORMENA, C. A.; MOREIRA, H.; ZOTARELI, L.; BEITOLI JR, E.; ANGHINONI, G. Sampling position under no-Tillage System affects the results of soil physical properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 40, p. 1590-1602, 2016.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e agroctenologia**. v. 38, n. 2, p. 1413-7054, 2014.

GARRETT, R. D.; NILES, M. T.; GIL, J. D. B.; GAUDIN, A.; CHAPLIN-KRAMER, R.; ASSMANN, T. S.; BREWER, K.; CARVALHO, P. C. F.; CORNER, O.; DYNES, R.; GARBACH, K.; EBREAB, E.; MUELLER, N.; PETERSON, C.; REIS, J. C.; SWON, V.; VALENTIM, J. Social and ecological analysis of commercial integrated crop livestock systems: current knowledge and remaining uncertainty. **Agricultural Systems**. V. 155, p.136-146, 2017.

GEE, G.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. de (Ed. 2). **Methods of Soil Analysis: physical and mineralogical methods**. American Society of Agronomy, Madison, Soil Science Society of America, p. 383-409, 1986.

GENRO JR, S. A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo Argissolo sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira Ciência do Solo**. v. 28, n.3, p.477-484, 2004.

GOTARDO, R.; PIAZZA, G. A.; TORRES, E.; SEVERO, D. L.; KAUFMAN, V. Distribuição espacial e temporal das chuvas no estado de Santa Catarina. **Geosul**. V. 33, n. 67, p. 253-276, 2018.

GREGORY, A. S.; WATTS, C. W.; GRIFFITHS, B. S.; HALLETT, P. D.; KUAN, H. L.; WHITMORE, A. P. The effect of long-term soil management on the physical and biological resilience of a range of arable and grassland soils in England. **Geoderma**. v.153, p. 172-185, 2009.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. de (Ed.3) **Methods of soil analysis**. American Society of Agronomy, Madison, Soil Science Society of America; p. 201-28, 2002.

HEINO, M.; PUMA, M. J.; WARD, P. J.; GERTEN, D.; HECK, V.; SIEBERT, S.; KUMMU, M. Two-thirds of global cropland area impacted by climate oscillations. **Nature communications**. v. 9, n.1, p. 1257-1267, 2018.

KUNRATH, T. R.; CARVALHO, P. C. F.; CADENAZZI, M.; BREDEMEIER, C.; ANGHINONI, I. Grazing management integrated crop-livestock system: soybean development and grain yield. **Revista Ciência Agronômica**. v. 46, p. 645-653, 2015.

KUNZ, M.; GONÇALVES, A. D. M. A.; REICHERT, J. M.; GUIMARÃES, R. M. L.; REINERT, D. J.; RODRIGUES, M. F. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 37, n. 6, p. 1699-1708, 2013.

LAMANDE, M.; SCHJØNNING, P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: effect of Tyre size, inflation pressure and wheel load. **Soil & Tillage Research**. v.114, p. 71-77, 2011.

LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERSB, A.; CARVALHO, P. C. F.; DEDIEU, B. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v. 190, p. 4-8, 2014.

MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES, M. F.; AWE, G. O.; MENTGES, L. R. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. **Geoderma**.v. 263, p. 47-59, 2016.

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**. v. 57, p. 4-9. 2014.

MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; BETIOLI JR, E.; PETEAN, L. P.; ALVES, S.J. Influência da altura de pastejo de azevém e aveia em atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico, após sete anos sob integração Lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do solo**. v. 38, n.4, p. 315-1326, 2014.

MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; KARLEN, D. L.; DA SILVA, A. P.; KELLER, T.; BETIOLI JR, E. Seasonal changes in soil physical properties under long-term no-tillage. **Soil & Tillage Research**.v.160, p. 53-64, 2016.

PACHEPSKY, Y.; PARK, Y. Saturated hydraulic conductivity of us soils grouped according to textural class and bulk density. **Soil science society of america journal**. v. 79, p. 1094-1100, 2015.

REICHERT, J. M.; KAISER, D. R.; REINERT, D.J.; RIQUELME, U. F. B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa agropecuária brasileira**. v. 44, n.3, p. 310-319, 2009.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; FOX, C. A.; YANG, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**. v. 152, p. 252-263, 2009.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; YANG, X. M.; TAN, C. S. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**. v. 146, p. 466-474, 2008.

SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; SILVA, E. M.; SILVEIRA, P. M.; BECQUER, T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 46, n.10, p. 1339-1348, 2011.

SCHJØNNING, P.; THOMSEN, I. K. Shallow tillage effects on soil properties for temperate-region hard-setting soils. **Soil & Tillage Research**.v. 132, p.12-20, 2013.

SILVA, S. G. C.; DA SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; MORAES SÁ, J. C. Temporary Effect of Chiseling on the Compaction of a Rhodic Hapludox under No-Tillage. **Revista Brasileira de Ciência do solo**. v. 36, p. 547-555, 2012.

VALBOA, G.; LAGOMARSINO, A.; BRANDI, G.; ANGNELLI, A. E.; SIMONCINI, S.; PAPPINI, R.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Long-term variations in soil organic matter under different tillage intensities. **Soil & Tillage Research**. v. 154, p. 126-135, 2015.

VEIGA, M.; DURIGON, L.; PANDOLFO, C. M.; BALBINOT JR, A. A. Atributos de solo e de plantas afetados pelo manejo da pastagem anual de inverno em sistema de integração lavoura-pecuária. **Ciência Rural**. v. 42, n. 3, p. 444-450, 2012.

VEPRASKAS, M.J. Bulk density values diagnostic of restricted root growth in coarse textured soils. **Soil Science Society of America Journal**. v. 52, p.1117-1121, 1988.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**. v. 4, p. 242-246, 1961.

WHITE, R. E. **Principles and Practice of Soil Science**, 4. ed. Oxford, UK : Blackwell Publishing, 2006.