



RODRIGO FONSECA DA SILVA

**COMPORTAMENTO FÍSICO-HÍDRICO DE SOLOS
SUBMETIDOS AO PREPARO E MANEJO SOB LAVOURA
CAFEEIRA**

**LAVRAS – MG
2018**

RODRIGO FONSECA DA SILVA

**PHYSICAL-HYDRIC BEHAVIOR OF SOILS SUBMITTED TO THE PREPARED
AND MANAGEMENT UNDER COFFEE PLANTATIONS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira
Orientador

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva
Coorientador

**LAVRAS – MG
2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Rodrigo Fonseca da.

Comportamento físico-hídrico de solos submetidos ao preparo e
manejo sob lavoura cafeeira / Rodrigo Fonseca da Silva. - 2018.

80 p.

Orientador(a): Geraldo César de Oliveira.

Coorientador(a): Bruno Montoani Silva.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Manejo do solo. 2. Intervalo Hídrico Ótimo. 3. Movimento
de água. I. Oliveira, Geraldo César de. II. Silva, Bruno Montoani.
III. Título.

RODRIGO FONSECA DA SILVA

**PHYSICAL-HYDRIC BEHAVIOR OF SOILS SUBMITTED TO THE PREPARED
AND MANAGEMENT UNDER COFFEE PLANTATIONS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 14 de março de 2018.

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior
Prof. Dr. Sérgio Henrique Godinho Silva
Prof. Dr. Alberto Colombo
Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

DCS/UFLA
DCS/UFLA
DEG/UFLA
IF Goiano

Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira
Orientador

**LAVRAS – MG
2018**

BIOGRAFIA

Rodrigo Fonseca da Silva, nascido em 11 de julho de 1989, na localidade de Corrente dos Matões do município de Bom Jesus – PI, filho de Pedro Rosa da Silva e Zilda dos Santos Fonseca completou o ensino fundamental, em 2004, na Escola Municipal Maria Aristeia Figueiredo da Fonseca (EMMAFF). Em 2007, concluiu o ensino médio na Unidade Escolar Joaquim Parente (UEJP). Em 2008, concluiu o curso Técnico em Agropecuária em concomitância com o ensino médio pelo Colégio Agrícola de Bom Jesus (CABJ). Ingressou no curso de Engenharia Agrônômica no ano de 2009, o qual concluiu em 2013 pela Universidade Federal do Piauí (UFPI). No mesmo ano, deu início ao mestrado junto ao programa de Pós-Graduação em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas (PPGSNP) da mesma instituição, o qual finalizou na data de sua defesa em fevereiro de 2015. Nesse mesmo ano, deu início ao doutorado em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras (UFLA), do qual fez parte até sua defesa em março de 2018.

*Aos meus pais, Pedro Rosa da Silva e Zilda dos Santos Fonseca,
À minha esposa Máisa, e filhos Pedro Rodrigo e Maria Sophia
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e sabedoria, por iluminar o meu caminho durante esta caminhada árdua;

À Universidade Federal de Lavras – UFLA, pela oportunidade concedida para a realização do doutorado;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de doutorado, que me possibilitou realizar a pesquisa de tese;

A CAPES e a FAPMIG pelo fomento à pesquisa realizada. Ao Departamento de Ciência do Solo (DCS), por disponibilizar condições para a realização do estudo;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira, pelo exemplo de dedicação a pesquisa, seriedade, competência e pelos valiosos ensinamentos, contribuindo para meu crescimento profissional e pessoal;

Aos membros da banca, pela disponibilidade e pela valiosa colaboração para o enriquecimento dos trabalhos realizados;

A todos os funcionários do DCS-UFLA, em especial o Doroteo e Dulce, pelo carinho incondicional para com os discentes;

A todos os colegas de graduação e pós-graduação pela convivência e amizade. Em especial, a Samara, Luiz Felipe, Pedro, Diego, Deivison, Fernanda, Franklin, Flavia, por todos os anos compartilhados de Ciência do Solo.

Aos meus amigos Patriciane, Matias e Geslin, por todos os momentos de aprendizagem que vivemos juntos. Aos meus irmãos de república Jodean, Ernandes, Leandro e Ferreira que foram minha família durante toda essa jornada;

A toda minha família, em especial meus filhos Pedro Rodrigo e Maria Sophia, e a minha esposa Maiza, por me lembrarem da importância de desfrutar os pequenos momentos da vida e por estarem sempre me motivando. Aos meus irmãos Robson, Rogerio e Zelia, pelo apoio em todas as horas. Mas, principalmente, a meus pais Pedro e Zilda, por terem acreditado em mim, e mesmo quando eu deixei de acreditar, eles se mostraram um exemplo de determinação, perseverança e companheirismo em todo esse período..., obrigado por acreditarem em mim, pois às vezes tudo o que uma pessoa precisa para realizar grandes feitos é de alguém que acredite nela;

A todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para essa conquista.

MUITO OBRIGADO!

“Sorte é a união do preparo com a oportunidade”. (Prof. Salmeron, in memoriam)

“Os problemas significativos que enfrentamos não podem ser resolvidos no mesmo nível de pensamento em que estávamos quando os criamos”. (Albert Einstein)

RESUMO

No Brasil, a cafeicultura é uma atividade de grande expressividade. Isso porque, a cadeia produtiva de café é diretamente responsável pelo desenvolvimento socioeconômico de muitas regiões brasileiras, garantindo a produção e distribuição de riquezas, além de gerar empregos. Dentre os estados brasileiros, Minas Gerais e o Espírito Santo são os maiores produtores dessa cultura. Embora essas regiões sejam grandes produtoras de café, a expansão das atividades produtivas depende da incorporação de novas áreas para o cultivo de café. Desse modo, a concorrência com outras culturas de valor econômico agregado, força os produtores a introduzir as lavouras de café em áreas com solos mais restritivos fisicamente, em razão de sua gênese, como é o caso dos solos adensados. Portanto, o uso de técnicas que viabilizem a produção de café nessas áreas é fundamental para o desenvolvimento adequado do cafeeiro, principalmente em regiões onde há ocorrência de veranicos ou escassez de chuvas. Mediante a esse contexto, os objetivos do estudo foram: i) Estabelecer condições físico-hídricas de Latossolos coesos que podem afetar o manejo da irrigação, bem como prever consequências, servindo como subsídio de manejo para a cafeicultura irrigada estabelecida nesses solos do norte do estado do Espírito Santo, Brasil; ii) Estudar a dinâmica da água em perfis de um Cambissolo submetido a diferentes sistemas de preparo na linha de plantio associado ao uso da braquiária na entrelinha de cafeeiros. No experimento 1, situado nos municípios de São Mateus e Jaguaré, no Norte do Espírito Santo, foram estudadas duas classes de solos sob cafeicultura irrigada: Latossolo Amarelo Distrocoeso irrigado por aspersão e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico irrigado por gotejamento. Nesse caso, as variáveis avaliadas foram: densidade do solo, retenção de água, resistência a penetração das raízes e intervalo hídrico ótimo. Já o experimento 2 foi conduzido em um Cambissolo que está situado no município de Nazareno, estado de Minas Gerais, Brasil, onde foram avaliados cinco tratamentos, dispostos da seguinte forma: Sulco de plantio do café revolvido a 0,40 m de profundidade (PS40); Sulco de plantio do café revolvido a 0,60 m de profundidade (PS60); Sulco de plantio do café revolvido a 0,80 m de profundidade (PS80); Entrelinha com cobertura de braquiária (EL,) e o Cerrado nativo (CN), que representa a condição de equilíbrio. Foram avaliadas a infiltração de água em diferentes tensões, a condutividade de água em solo saturado, a condutividade de água em solo não saturado e retenção de água. Os resultados demonstram que no Latossolo coeso o uso do IHO permitiu identificar a faixa de umidade que a irrigação deve ser manejada para que a planta expresse o seu máximo potencial produtivo. No Cambissolo, o revolvimento do sulco de plantio promovido pela enxada rotativa associado à subsolagem nas profundidades de 0,60 m e 0,80 m melhorou a infiltração, armazenamento e movimento de água até 0,50 m de profundidade.

Palavras-chave: Solos adensados. Qualidade físico-hídrica. Movimento de água. Manejo da irrigação. Preparo do solo. Produção de café

ABSTRACT

In Brazil, coffee cultivation is an activity of great expressiveness. This occurs because the coffee production chain is directly responsible for the socio-economic development of many Brazilian regions, ensuring the production and distribution of wealth, and job generation. Among the Brazilian states, Minas Gerais and Espírito Santo are the largest coffee producers. However, the expansion of productive activities depends on the incorporation of new areas for coffee cultivation. Thus, competition with other crops of aggregate economic value compels producers to introduce coffee crops into areas with more physically restrictive soils, due to its genesis, as in the case of condensed soils. Therefore, the use of techniques that enable coffee production in these areas is fundamental for the adequate development of coffee, especially in regions where Indian summer occurs or rainfall is scarce. In this context, the objectives of the study were: i) to establish the physical-hydric conditions of cohesive Latosols that can affect irrigation management and consequence prediction, subsidizing the management of the irrigated coffee crop established in these soils of northern Espírito Santo; ii) to study the dynamics of water in Cambisol profiles subjected to different preparation systems associated to the use of brachiaria in the coffee row spacing. In experiment 1, located in the municipalities of São Mateus and Jaguaré, in northern Espírito Santo, two classes of soils under irrigated coffee crop were studied: Dystrocohesive Yellow Latosol in spray irrigation and Dystrophic Red-Yellow Latosol in drip irrigation. In this case, the evaluated variables were: soil density, water retention, resistance to root penetration and least limiting water range (LLWR). Experiment 2 was conducted in a Cambisol located in the municipality of Nazareno, state of Minas Gerais. Five treatments were evaluated, arranged as follows: coffee furrow revolved at 0.40 m of depth (PS40); coffee furrow revolved at 0.60 m of depth (PS60); coffee furrow revolved at 0.80 m of depth (PS80); row spacing with brachiaria cover (EL,) and the native Cerrado (CN), which represents the balance condition. Water infiltration at different tensions, water conductivity in saturated soil, water conductivity in unsaturated soil and water retention were evaluated. The results show that, in cohesive Latosol, the use of LLWR allowed the identification the range of moisture in which irrigation should be managed for the plant to express its maximum productive potential. In Cambisol, the planting furrow revolving done using rotary tiller associated to the subsoiling at the depths of 0.60 m and 0.80 m improved infiltration, storage and water movement up to 0.50 m of depth.

Keywords: Condensed soils. Physical-hydric quality. Water movement. Irrigation management. Soil preparation. Coffee production

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1 – CONDICIONAMENTO FÍSICO-HÍDRICO DE LATOSSOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS SOB CAFEICULTURA IRRIGADA: INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO COMO INTERPRETAÇÃO PARA MANEJO

- Figura 1.** Localização das áreas de estudo, nos municípios de São Mateus e Jaguaré no norte do estado do Espírito Santo, Brasil. Classes de solos estudadas: Latossolo Amarelo Distrocoeso (LAdx) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd). 45
- Figura 2.** Paisagem e perfil do Latossolo Amarelo Distrocoeso em São Mateus – ES (A e B) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico em Jaguaré – ES (C e D). 46
- Figura 3.** Curva de retenção de água de dois solos sob cafeeiro irrigado nos municípios de São Mateus e Jaguaré na região norte do Espírito Santo, Brasil. 47
- Figura 4.** Relação entre tensões de água no solo e resistência à penetração em dois solos sob cafeeiro irrigado nos municípios de São Mateus e Jaguaré na região norte do Espírito Santo, Brasil Níveis de significância pelo teste F: ** ($p < 0,01$); * ($0,01 < p < 0,05$), ^{ns} ($p > 0,05$). 47
- Figura 5.** Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) em dois solos sob cafeeiro irrigado nos municípios de São Mateus e Jaguaré na região norte do Espírito Santo, Brasil. PA: Porosidade de aeração mínima de $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$; CC: Capacidade de campo na sucção de 6 kPa; RP: Resistência à penetração crítica em 3 MPa; $\theta_{\text{Crítico}}$: conteúdo de água crítico (uso de 50% da água disponível) abaixo do qual há restrições a atividade transpiratória; Dsc: Densidade do solo crítica quando IHO = 0. 48

ARTIGO 2 – DINÂMICA DA ÁGUA EM CAMBISSOLO SUBMETIDO A DIFERENTES PRATICAS DE MANEJO NA CAFEICULTURA

- Figura 1.** Localização da área de estudo, município de Nazareno no estado de Minas Gerais, Brasil. 54
- Figura 2.** Representação esquemática do Cambissolo sob Cerrado nativo (a), sistema SP40 = Sulco de plantio preparado a 0,40 m de profundidade (b), SP60 = Sulco de plantio revolvido a 0,60 m de profundidade (c) e SP80 = Sulco de plantio revolvido a 0,80 m de profundidade (d) em lavoura cafeeira: A, A/B, Bi, B/C e C são horizontes do solo. 55
- Figura 3.** Valores de velocidade de infiltração básica (VIB) obtidos nas tensões de 0, 0,05, 0,20 e 0,30 m em cinco sistemas de manejo: PS40 = Sulco de plantio preparado a

0,40 m de profundidade, PS60 = Sulco de plantio revolvido a 0,60 m de profundidade, PS80 = Sulco de plantio revolvido a 0,80 m de profundidade, EL = entrelinha com plantio de braquiária, CN = Cerrado nativo. Médias seguidas pela mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste de Skott Knott ($p \leq 0,05$).....62

Figura 4. Semivariogramas experimentais e teóricos dos dados de condutividade hidráulica saturada para os sistemas de manejo: PS40 = Sulco de plantio preparado a 0,40 m de profundidade, PS60 = Sulco de plantio revolvido a 0,60 m de profundidade, PS80 = Sulco de plantio revolvido a 0,80 m de profundidade, EL = entrelinha com plantio de braquiária, CN = Cerrado nativo. Parâmetros do semivariograma: C_0 = efeito pepita, C_1 = contribuição, d = distância entre pares de pontos, a = alcance. DE = dependência espacial.....65

Figura 5. Mapa da permeabilidade (K_o , mm h^{-1}) do solo, ao longo do perfil, para os sistemas de manejo: PS40 = Sulco de plantio preparado a 0,40 m de profundidade, PS60 = Sulco de plantio revolvido a 0,60 m de profundidade, PS80 = Sulco de plantio revolvido a 0,80 m de profundidade, EL = entrelinha com plantio de braquiária, CN = Cerrado nativo.66

Figura 6. Curvas de retenção de água (θ , teor volumétrico de água), curvas de distribuição de poros ($S(h)$, volume de poros normalizados) e condutividade hidráulica não saturada (K) para sistemas de manejo: PS40 = Sulco de plantio preparado a 0,40 m de profundidade, PS60 = Sulco de plantio revolvido a 0,60 m de profundidade, PS80 = Sulco de plantio revolvido a 0,80 m de profundidade, EL = entrelinha com plantio de braquiária, CN = Cerrado nativo. Classes de poros: Ma, macroporos; Mg, Mesoporos grandes; Mm, Mesoporos médios; Mf, Mesoporos finos; Mi, Microporos.71

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1 – CONDICIONAMENTO FÍSICO-HÍDRICO DE LATOSSOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS SOB CAFEICULTURA IRRIGADA: INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO COMO INTERPRETAÇÃO PARA MANEJO

Tabela 1. Divisão unitária das partículas por tamanho para o Latossolo Amarelo Distrocoeso (LAdx) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd).44

Tabela 2. Atributos físico-hídricos de dois solos sob cafeeiro irrigado nos municípios de São Mateus e Jaguaré na região norte do Espírito Santo, Brasil.44

ARTIGO 2 – DINÂMICA DA ÁGUA EM CAMBISSOLO SUBMETIDO A DIFERENTES PRATICAS DE MANEJO NA CAFEICULTURA

Tabela 1. Descrição das operações realizadas em cada tratamento na área de estudo, município de Nazareno no estado de Minas Gerais, Brasil.56

Tabela 2. Distribuição das partículas do solo por tamanho nos diferentes sistemas de manejo para cafeicultura e na área de referência sem cultivo agrícola.57

Tabela 3. Análise exploratória e parâmetros do semivariograma para condutividade hidráulica saturada (K_o) do Cambissolo nos diferentes manejos adotados.64

Tabela 4. Parâmetros do modelo de van Genuchten para diferentes tratamentos aplicados ao Cambissolo. Umidade de saturação (θ_s , $m^3 m^{-3}$), umidade residual (θ_R , $m^3 m^{-3}$), parâmetros de ajuste (α e n) e coeficiente de determinação (R^2).....67

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	15
1	INTRODUÇÃO GERAL	15
2	REFERÊNCIAS	19
	SEGUNDA PARTE – ARTIGOS	22
	ARTIGO 1 – CONDICIONAMENTO FÍSICO-HÍDRICO DE LATOSSOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS SOB CAFEICULTURA IRRIGADA: INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO COMO INTERPRETAÇÃO PARA MANEJO	22
1	INTRODUÇÃO	25
2	MATERIAL E MÉTODOS	26
2.1	Descrição das áreas de estudo e classificação dos solos	27
2.2	Amostragem de solo	27
2	Análise textural	27
2.4	Porosidade, densidade do solo, curva de retenção de água, água disponível e capacidade de água disponível	28
2.5	Resistência do solo à penetração	29
2.6	Recursos computacionais	31
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
3.1	Porosidade do solo	31
3.3	Retenção de água no solo	34
3.4	Resistencia do solo à penetração	34
3.5	Intervalo hídrico ótimo	35
4	CONCLUSÕES	40
5	AGRADECIMENTOS	40
6	REFERENCIAS	40
	ARTIGO 2 – DINÂMICA DA ÁGUA EM CAMBISSOLO SUBMETIDO A DIFERENTES PRATICAS DE MANEJO NA CAFEICULTURA	50
1	INTRODUÇÃO	52
2	MATERIAL E MÉTODOS	53
2.1	Descrições da área de estudo	53
2.2	Descrição dos tratamentos e preparo do sulco de plantio	54
2.2.1	Sistemas de manejo	54
2.2.2	Preparo do sulco de plantio	56
2.3	Análise textural	56
2.4	Infiltração de água no solo	58
2.5	Condutividade hidráulica do solo saturado (K_0)	58

2.6	Curva de retenção de água no solo.....	59
2.7	Curva de distribuição de poros por volume	59
2.8	Condutividade hidráulica do solo não-saturado.....	60
2.9	Tratamento de dados e análises estatísticas	60
2.9.1	Geoestatística	60
2.9.2	Comparação de médias e ajustes de modelos.....	61
2.9.3	Recursos computacionais	61
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
3.1	Velocidade de infiltração básica (VIB)	62
3.2	Variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada.....	64
3.3	Modelo de van Genuchten e comportamento hidrodinâmico do solo	67
4	CONCLUSÃO.....	73
5	AGRADECIMENTOS.....	73
6	REFERÊNCIAS	73

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é o maior produtor mundial de café, sendo essa cultura um importante provedor de emprego e renda nas regiões produtoras. Dentre os estados produtores, destacam-se Minas Gerais, com mais de 68 % da produção de arábica (*Coffea arabica*), e o Espírito Santo, que contribui com mais de 61% da produção de café conilon (*Coffea canephora*) (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2018). Embora essas regiões tenham destaque no cenário nacional, algumas limitações relativas aos solos, particularmente, no que diz respeito, à disponibilidade de água para as plantas, dificulta o avanço da cafeicultura.

Nesse sentido, é importante destacar que o acesso a água é fundamental para o bom desempenho do cafeeiro (RIBEIRO et al., 2017; RODRIGUES et al., 2015) sob qualquer sistema agrícola. Todavia, os cafeicultores têm enfrentado sérios problemas relacionados às condições climáticas, sobretudo, em função da ocorrência de veranicos em determinadas épocas do ano, que trazem restrições hídricas ao cultivo de café (SERAFIM et al., 2013a). Por esse motivo, é imprescindível o uso de sistemas de manejo que favoreçam o aprofundamento radicular ou mesmo o uso da irrigação, sobretudo em classes de solos com restrições físico-hídricas.

Esses problemas se agravam à medida que a disputa por espaço (BERNARDES et al., 2012), principalmente nas últimas décadas, tem levado os cafeicultores a expandir as lavouras para classes de solos mais limitadas fisicamente, cujos principais problemas estão relacionados, ao adensamento ou à disponibilidade hídrica, o que dificulta o desenvolvimento radicular das culturas, a exemplo do que acontece em Latossolos coesos (SOUZA, 1997; SOUZA; SOUZA; LEDO, 2004) e Cambissolos (SERAFIM et al., 2013a, 2013b).

Assim, destaca-se que, em alguns Latossolos, a presença do caráter coeso afeta os processos inerentes à física do solo como, por exemplo: a drenagem, água disponível, aeração, temperatura, resistência a penetração radicular e absorção de nutrientes, tendo reflexos negativos na produção agrícola (JACOMINE, 1996; NACIF et al., 2008; RESENDE et al., 2014). Esses problemas se agravam nos horizontes coesos mais argilosos, com textura argilo-arenosa ou mais fina. Nesses casos, o desenvolvimento do sistema radicular é limitado pela dureza, quando o solo está seco (em razão do aumento da resistência à penetração), e pela falta de aeração, quando os poros estão cheios de água (no período chuvoso ou sob irrigação) (RESENDE et al., 2014; REZENDE, 2000; SOUZA; SOUZA; LEDO, 2004).

Embora seja onerosa, a produção nos Latossolos coesos dos Tabuleiros Costeiros do Espírito Santo é fundamental para a economia do estado. Esses solos se estendem por uma área de, aproximadamente, 464 mil hectares (cerca de 10 % da área do estado) (ACHA PANOSO et al., 1978). Desse modo, a busca por soluções para as limitações desses solos, é necessária para a implantação e condução da cafeicultura, uma vez que as tecnologias convencionais de manejo não garantem uma produção economicamente sustentável.

Na tentativa de contornar o problema da escassez de chuvas e do baixo desenvolvimento radicular do cafeeiro sob os Latossolos coesos (CASTRO et al., 2010; PEZZOPANE et al., 2010), muitos produtores têm buscado implantar sistemas de irrigação (GALEANO et al., 2016). Essa técnica pode ser eficiente nesses solos (BONOMO et al., 2014), no entanto, em decorrência dos problemas relacionados à alta resistência a penetração das raízes e a pouca porosidade de aeração, a faixa de água disponível nesses solos fica muito estreita.

Em meio a esse cenário, o conhecimento do intervalo hídrico ótimo (IHO) (SILVA et al., 2017; SILVA; KAY; PERFECT, 1994) pode auxiliar os produtores na predição do comportamento físico-hídrico dos Latossolos coesos. Uma vez que, o uso do IHO possibilita a definição da faixa ideal de umidade no solo (FERREIRA et al., 2017; SILVA et al., 2017; SILVA; KAY; PERFECT, 1994), podendo então, ser incorporado à elaboração de projetos de irrigação, por estar diretamente ligado à umidade, aeração, densidade do solo e resistência à penetração, que são fatores que influenciam fortemente na produtividade das culturas, sobretudo em solos com esse caráter.

No caso dos Cambissolos, os principais obstáculos para a sua exploração são a pouca profundidade efetiva a ser explorada pelo sistema radicular das culturas, baixa fertilidade natural, ocorrência em relevos mais movimentados e os teores elevados de silte e areia fina. Esses fatores em conjunto favorecem o encrostamento, o que reduz a infiltração de água nesses solos, potencializando o deflúvio superficial e, conseqüentemente, os processos erosivos (HORTA et al., 2009; PEREIRA et al., 2012; RESENDE et al., 2014). Tais atributos dificultam o desenvolvimento do cafeeiro, que é muito exigente em termos de solo (EFFGEN et al., 2012; GUIMARÃES; LOPES, 1986; MATIELLO, 1991).

Em razão dessa dificuldade em produzir café sob os Cambissolos, a produção de café em Minas Gerais se concentra, principalmente, nos Latossolos e Argissolos (cerca de 86%) os quais apresentam características físicas ou químicas mais favoráveis. Já as plantações em Cambissolos representam apenas 10% (cerca de 100 mil ha) do café cultivado no estado (BERNARDES et al., 2012). Todavia, essa classe de solos representa uma área de,

aproximadamente, 10,5 milhões de hectares, o que corresponde a, aproximadamente, 18% da área total do estado (AMARAL et al., 2004). Desse modo, a criação de novas técnicas de manejo que possibilitem um melhor uso agrícola das glebas recobertas por Cambissolos, a exemplo do que foi notificado em trabalhos realizados por Serafim et al. (2011, 2013a, 2013b), podem auxiliar na expansão da cafeicultura no estado.

Estudos têm demonstrado que o preparo profundo do solo por ocasião da implantação da cultura, proporciona alteração da estrutura, em razão do revolvimento deixando-o mais solto, melhorando o sistema poroso, com incremento na macroporosidade, diminuição da densidade, e assim fornecendo melhores condições para o desenvolvimento e crescimento do sistema radicular em profundidade (OLIVEIRA et al., 2003; RENA; GUIMARÃES, 2000; SERAFIM et al., 2011, 2013a, 2013b).

Embora os benefícios do revolvimento do solo sejam facilmente perceptíveis na cultura do cafeeiro (SERAFIM et al., 2011, 2013a, 2013b), essa prática pode ter aspectos negativos quanto à dinâmica de água no solo. Além disso, particularmente, quando é feita a subsolagem, as melhorias proporcionadas podem ser temporárias, visto que a reconsolidação do solo acontece, em razão do movimento da água no perfil do solo favorecida pelo efeito cumulativo das precipitações (BUSSCHER; BAUER; FREDERICK, 2002; VIANA; FERNANDES FILHO; SCHAEFER, 2004).

Em áreas de cafeicultura, uma sugestão para a manutenção da alteração estrutural ocasionadas pelo revolvimento profundo do solo é associar esse tipo de preparo com o cultivo de plantas de cobertura (a exemplo da braquiária) na entrelinha que é roçada, periodicamente, por meio de roçadora ecológica que direciona o material para a linha da cultura principal (SERAFIM et al., 2011, 2013a, 2013b). O material cortado da braquiária incrementa os conteúdos de matéria orgânica do solo, promovendo aumento da população microbiana e consequente agregação do solo (RIZZO, 2000).

Ademais, as alterações nos atributos físico-hídricos do solo estão associadas ao manejo, uma vez que o armazenamento de água no solo, varia em função do volume de água que infiltra e dos fatores que colaboram para a sua permanência ao alcance do sistema radicular do cafeeiro. Nesse sentido, em razão das regiões produtoras de café do Espírito Santo e Minas Gerais serem carentes de estudos que objetivam buscar opções de manejo nos solos adensados, são necessárias mais pesquisas que viabilizem condições favoráveis para o enraizamento contínuo da cultura, melhorando a disponibilidade de água para as plantas nos mais diferentes solos.

Diante do exposto, neste trabalho, objetivou-se: i) Estabelecer as condições físico-hídricas de Latossolos coesos que podem afetar o manejo da irrigação, bem como prever consequências, servindo como subsídio de manejo para a cafeicultura irrigada estabelecida nestes solos do norte do estado do Espírito Santo, Brasil; ii) Estudar a dinâmica da água em perfis de um Cambissolo submetido a diferentes sistemas de preparo na linha de plantio associado ao uso da braquiária na entrelinha de cafeeiros.

2. REFERÊNCIAS

- ACHA PANOSO, L. et al. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Espírito Santo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1978. (Boletim Técnico, 45).
- AMARAL, F. C. S. et al. **Mapeamento de solos de aptidão agrícola das terras do estado de Minas Gerais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 63).
- BERNARDES, T. et al. Diagnóstico físico-ambiental da cafeicultura no estado de Minas Gerais – Brasil. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 139-151, maio/ago. 2012.
- BONOMO, D. Z. et al. Alternativas de manejo de água de irrigação em cultivos de conilon. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 4, p. 537-545, out./dez. 2014.
- BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; FREDERICK, J. R. Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, n. 1, p. 49-57, Oct. 2002.
- CASTRO, F. S. et al. Zoneamento agroclimático para espécies do gênero Pinus no estado do Espírito Santo. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 235-250, jan./mar. 2010.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Primeiro levantamento [café] – Safra 2018. **Acompanhamento da safra brasileira - Café**, Brasília, v. 5, n. 1, p. 1-73, jan. 2018. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe>>. Acesso em: 20 jan. 2018.
- EFFGEN, T. A. M. et al. Propriedades Físicas do Solo in função de manejos em lavouras de cafeeiro conilon. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 59, n. 3, p. 414-421, jun. 2012.
- FERREIRA, C. J. B. et al. Effects of water table management on least limiting water range and potato root growth. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 186, n. 1, p. 1-11, May 2017.
- GALEANO, E. A. V. et al. Consolidação das estatísticas agropecuárias de 2015 e previsão da produção agrícola para 2016. **Boletim da Conjuntura Agropecuária Capixaba**, Vitória, v. 1, n. 5, p. 3-17, mar. 2016.
- GUIMARÃES, P. T. G.; LOPES, A. S. Solos para o cafeeiro: Características, propriedades e manejo. In: RENA, A. B. et al (Ed.). **Cultura do cafeeiro: Fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa a Potássio e do Fósforo, 1986. p. 115-156.
- HORTA, I. M. F. et al. Levantamento de reconhecimento com apoio digital dos solos do município de Nazareno-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 1, p. 1940-1947, 2009.
- JACOMINE, P. K. T. Distribuição Geográfica, Características e Classificação dos Solos Coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS DOS

TABULEIROS COSTEIROS, 1996, Cruz das Almas. **Anais...** Cruz das Almas: EMBRAPA/UFBA, 1996. p. 13-26.

MATIELLO, J. B. **O café: do cultivo ao consumo.** São Paulo: Globo, 1991. (Coleção do Agricultor - Grãos Quimbrasil).

NACIF, P. G. S. et al. Efeitos da subsolagem em propriedades físico-hídricas de um Latossolo Amarelo Distrocoeso do estado da Bahia. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 20, n. 2, p. 186-192, abr./jun. 2008.

OLIVEIRA, G. C. et al. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 773-781, out. 2003.

PEREIRA, J. A. A. et al. Caracterização dos atributos dos regolitos de uma voçoroca em Nazareno, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 7, n. 2, p. 204-212, abr./jun. 2012.

PEZZOPANE, J. R. M. et al. Zoneamento de risco climático para a cultura do café Conilon no Estado do Espírito Santo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 3, p. 341-348, jul./set. 2010.

RENA, A. B.; GUIMARÃES, P. T. G. **Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam.** Belo Horizonte: EPAMIG, 2000. (Documentos, 37).

RESENDE, M. et al. **Pedologia: Base para distinção de ambientes.** 6. ed. rev. ampl. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2014.

REZENDE, J. O. **Solos coesos dos Tabuleiros Costeiros: limitações agrícolas e manejo.** Salvador: SEAGRI, 2000. (Série Estudos Agrícolas, 1).

RIBEIRO, A. F. F. et al. Paclobutrazol e restrição hídrica no crescimento desenvolvimento de plantas de café. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 4, p. 534-543, out./dez. 2017.

RIZZO, L. T. B. **Indicadores da resiliência do Latossolo Vermelho escuro cultivado com citros e eucalipto em Itapetininga-SP: recuperação de um solo degradado pela compactação.** 2000. 200 p. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

RODRIGUES, R. R. et al. Disponibilidade hídrica no solo no desenvolvimento inicial do cafeeiro conilon. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 1, p. 46-55, jan./mar. 2015.

SERAFIM, M. E. et al. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 4, p. 362-370, apr. 2013a.

SERAFIM, M. E. et al. Qualidade física e intervalo hídrico ótimo em Latossolo e Cambissolo, cultivados com cafeeiro, sob manejo conservacionista do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, n. 3, p. 733-742, jun. 2013b.

SERAFIM, M. E. et al. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: Um estudo de caso. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 6, p. 964-977, nov./dez. 2011.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, R. F. et al. Impacts of land-use and management systems on organic carbon and water-physical properties of a Latossolo Amarelo (Oxisol). **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 38, n. 1, p. 109-124, jan./fev. 2017.

SOUZA, L. D.; SOUZA, L. S.; LEDO, C. A. S. Disponibilidade de água em pomar de citros submetido a poda e subsolagem em Latossolo Amarelo dos Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 69-73, abr. 2004.

SOUZA, L. S. Aspectos sobre o uso e manejo dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22 n. 1, p. 34-39, 1997.

VIANA, J. H. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R. Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 1, p. 11-19, fev. 2004.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO 1 – Condicionamento físico-hídrico de Latossolos dos Tabuleiros Costeiros sob cafeicultura irrigada: intervalo hídrico ótimo com interpretação para manejo

Artigo de acordo com as normas do periódico científico Coffee Science

CONDICIONAMENTO FÍSICO-HÍDRICO DE LATOSSOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS SOB CAFEICULTURA IRRIGADA: INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO COM INTERPRETAÇÃO PARA MANEJO

Rodrigo Fonseca da Silva^{1*}, Geraldo Cesar de Oliveira², Bruno Montoani Silva², Nilton Curi²

RESUMO: A produção de café conilon está relacionada ao desenvolvimento socioeconômico de muitas regiões brasileiras, produzindo e distribuindo riquezas, além de gerar empregos. Dentre as regiões produtoras de conilon, os Tabuleiros Costeiros, apresentam riscos edafoclimáticos para o cafeeiro nos períodos de floração, granação e crescimento vegetativo, o que torna a irrigação indispensável. Esse problema se torna ainda mais evidente frente as dificuldades inerentes à gênese dos Latossolos adensados que suportam grandes áreas de cafeicultura e compõem a maior parte dos Tabuleiros Costeiros. O presente estudo foi desenvolvido objetivando estabelecer condições físico-hídricas de Latossolos adensados que podem afetar o manejo da irrigação, bem como predizer consequências, servindo como subsídio de manejo para a cafeicultura irrigada estabelecida nestes solos do norte do estado do Espírito Santo, Brasil. Foram coletadas amostras nos horizontes A e BA de duas classes de solos sob cafeicultura irrigada foram dispostas da seguinte forma: Latossolo Amarelo Distrocoeso irrigado por aspersão e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico irrigado por gotejamento. As variáveis avaliadas foram: porosidade, densidade do solo, curva de retenção de água, água disponível e capacidade de água disponível, resistência do solo a penetração, e intervalo hídrico ótimo (IHO). O uso do IHO permitiu identificar a faixa de umidade que a irrigação deve ser manejada para que a planta expresse o seu máximo potencial produtivo.

¹ Doutorando em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, UFLA, Lavras, MG, Brasil. E-mail: rodrigo11.07@hotmail.com;

* Autor para correspondência

² Professor do departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, UFLA, Lavras, MG, Brasil. E-mail: geraldooliveira@dcs.ufla.br; montoani@gmail.com; niltcuri@dcs.ufla.br

Palavras-chave: água no solo, aspersão, gotejamento, horizonte coeso, Intervalo Hídrico Ótimo, produção de café

PHYSICAL-HIDRIC CONDITIONING OF OXISOLS OF COASTAL TABLELANDS UNDER IRRIGATED COFFEE: LEAST LIMITING WATER RANGE WITH INTERPRETATION FOR MANAGEMENT

ABSTRACT: The production of conilon coffee is related to the socio-economic development of many Brazilian regions, producing and distributing riches, besides generating jobs. Among the conilon producing regions, the Coastal Tablelands present edaphoclimatic risks to the coffee tree in the periods of flowering, granulation and vegetative growth, which makes irrigation indispensable. This problem becomes even more evident in view of the difficulties inherent to the genesis of the densified Oxisols that support large areas of coffee cultivation and make up most of the Coastal Trays. The objective of this study was to establish the physical and hydraulic conditions of densified Latosols that can affect the irrigation management, as well as to predict consequences, serving as a management subsidy for irrigated coffee cultivation established in these soils of the northern state of Espírito Santo, Brazil. Samples were collected in horizons A and BA of two classes of soils under irrigated coffee cultivation. They were arranged as follows: Yellow Latosol Distrocoeso irrigated by sprinkler and Dried Irrigated Dystrophic Red Yellow Latosol. The variables evaluated were: porosity, soil density, water retention curve, available water and available water capacity, soil penetration resistance, and least limiting water range (LLWR). The use of LLWR allowed to identify the range of humidity that irrigation should be managed in order for the plant to express its maximum productive potential.

Key-words: soil water, sprinkling, drip, cohesive horizon, least limiting water range, coffee production

1. INTRODUÇÃO

A cafeicultura é uma das atividades agrícolas de maior expressividade no Brasil e o café conilon (*Coffea canephora*) é uma das principais espécies cultivadas no país. O que gerou no ano de 2017 uma receita bruta relativa à comercialização de 2,75 bilhões de reais e milhares de empregos diretos e indiretos (CONAB, 2018). Entre os estados brasileiros, o Espírito Santo, com grande parte de sua área sob os Tabuleiros Costeiros, é o maior produtor dessa espécie, contribuindo com 61% da produção nacional (CONAB, 2018).

Apesar da expressividade deste setor, o cultivo de café conilon nos Tabuleiros Costeiros apresenta riscos climáticos para o cafeeiro nos períodos de floração, granação e crescimento vegetativo (PEZZOPANE et al., 2010; CASTRO et al., 2010), condicionando sérios prejuízos que podem totalizar perdas de até 50% na produção. Tendo em vista eventuais déficits hídricos da região, a irrigação já se faz presente em 80 % das lavouras cafeeiras (GALEANO et al., 2016), carecendo, entretanto, de estudos específicos seus solos (BONOMO et al., 2014).

O manejo da irrigação na região se depara com dificuldades inerentes à gênese dos Latossolos adensados que suportam grandes áreas de cafeicultura e compõem a maior parte dos Tabuleiros Costeiros (KER, 1997; CINTRA et al., 2009). Estes solos normalmente apresentam horizontes coesos (horizonte BA e parte do Bw) (KER, 1997; MOREAU et al., 2006) que dificultam sobremaneira o manejo das plantas cultivadas.

A formação desses solos coesos está estreitamente relacionada com os sedimentos da Formação Barreiras. É de se destacar que a gênese dos mesmos ainda é muito discutida, e na literatura é relatado que sua formação pode ser oriunda da interação de múltiplos fatores, dentre eles, o empacotamento de partículas (argilas); cimentação ocasionada pela sílica e outros aluminossilicatos; as ligações estabelecidas na polimerização e precipitação da

sílica/alumínio com as superfícies dos minerais, além da dispersão de argila e ação dos ciclos de umedecimento e secagem (SOUZA, 1997).

O adensamento, comum nestes solos, limita o desenvolvimento das raízes das plantas cultivadas na condição de baixa umidade, mas como eles se tornam friáveis a firmes quando úmidos (MOREAU et al., 2006), assim essa limitação é minimizada. Todavia, apesar de existirem sugestões de que as moléculas de água ao entrarem entre as partículas de argila orientadas reduziriam a coesão (ASSIS et al., 2009) com benefícios para o manejo e o desenvolvimento de raízes (GIAROLA e SILVA, 2002; SOUZA et al., 2014), é apontado na literatura que nestes solos o fluxo de ar é muito limitado (FERREIRA et al., 1999; LIMA et al., 2014), o que pode ocasionar prejuízos para a respiração das plantas.

Nesse sentido, o conhecimento do intervalo hídrico ótimo (IHO) pode auxiliar na predição do comportamento físico-hídrico dos solos adensados, conforme observado em estudos de eficiência produtiva (GATHALA et al., 2011; SERAFIM et al., 2013; SILVA et al., 2017). O uso do IHO auxilia na definição da faixa ideal de umidade no solo para o manejo da irrigação (BLAINSKI et al., 2009; FERREIRA et al., 2017), e deveria ser incorporado na elaboração de projetos de irrigação, por estar diretamente ligada a umidade, aeração do solo, além da densidade do solo e resistência a penetração, que são fatores que influenciam fortemente na produtividade das culturas.

Nesse contexto é possível estabelecer hipótese de que para os Latossolos adensados a aplicação de água em excesso pode levar à falta de oxigênio, enquanto a baixa umidade pode resultar em elevada resistência do solo à penetração de raízes. Deste modo, o presente estudo foi desenvolvido objetivando descrever condições físico-hídricas de Latossolos adensados que podem afetar a irrigação, bem como prever consequências, servindo como subsídio para manejo da cafeicultura irrigada, estabelecida nestes solos dos Tabuleiros Costeiros, Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição das áreas de estudo e classificação dos solos

O estudo foi realizado em solos utilizados com lavoura cafeeira comercial, implantada no final do ano de 2013, nos municípios de São Mateus, nas coordenadas 18° 42' 58" S, 39° 51' 21" W e Jaguaré nas coordenadas 18° 54' 21" S, 40° 04' 33" W, no norte do estado do Espírito Santo, Brasil (Figura 1). Os solos do estudo foram descritos e classificados segundo Embrapa (2013) como Latossolo Amarelo Distrocoeso (LAdx) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd), localizados em relevo plano, nas altitudes de 93 e 67 m, respectivamente (Figura 1).

A região apresenta clima do tipo Aw, de acordo com a classificação de Köppen, tropical com estação seca de inverno, precipitação e temperatura média de 1.240 mm ano⁻¹ e 24,2 °C, respectivamente (PEEL et al. 2007; CASTRO et al., 2010).

2.2. Amostragem de solo

As duas classes de solos sob cafeicultura irrigada foram avaliadas em horizontes distintos, dispostos da seguinte forma: As amostras foram coletadas com estrutura preservada, no meio do horizonte A e BA de cada solo, com três repetições (2 solos x 2 horizontes x 3 repetições) Latossolo Amarelo Distrocoeso irrigado por aspersão (Figura 2A e 2B) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico irrigado por gotejamento (Figura 2C e 2D).

2.3. Análise textural

A granulometria do solo foi determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 2017) e as frações granulométricas foram classificadas segundo o sistema norte americano (SOIL SURVEY STAFF, 2014). O resultado pode ser observado na Tabela 1.

2.4. Porosidade, densidade do solo, curva de retenção de água, água disponível e capacidade de água disponível

Amostras indeformadas de solos foram coletadas em cilindros de volume conhecido e no laboratório foram saturadas e submetidas as sucções de 2, 4, 6, 8 e 10 kPa, utilizando mesa de tensão e de 33, 60, 100, 500 e 1.500 kPa no extrator de Richards (EMBRAPA, 2017). Em seguida para essas sucções foram ajustadas as curvas de retenção de água (CRA) a partir do modelo proposto por Van Genuchten (1980) (Equação 1).

$$\theta = \theta_R + \frac{\theta_s - \theta_R}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m} \quad \text{Eq. 1}$$

em que: θ é o conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_s é o conteúdo de água na condição de solo saturado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_R é o conteúdo de água do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) na sucção de 1.500 kPa, h é o valor de sucção da água (kPa), α , n e $m = (1-1/n)$, são parâmetros empíricos da equação.

Após atingir o equilíbrio hídrico, as amostras foram pesadas em seguida colocadas em estufa a ± 105 °C, por 24 h, para determinação da densidade do solo (D_s) e da umidade volumétrica do solo (Θ) nos vários potenciais. O valor de Θ correspondente a sucção de 6 kPa utilizado na determinação da microporosidade (M_i). O volume total de poros foi obtido segundo a Equação 2, sendo D_p obtida segundo Embrapa (2011). A macroporosidade (M_a) foi calculada a partir da diferença entre VTP e M_i (EMBRAPA, 2017).

$$\text{VTP} = \left(1 - \frac{D_s}{D_p}\right) \quad \text{Eq. 2}$$

A água disponível (AD) foi estimada pela diferença entre a água na capacidade de campo (CC, umidade correspondente a sucção de 6 kPa) e no ponto de murcha permanente (PMP, umidade correspondente a sucção de 1500 kPa) (Equação 3). A partir desses limites, foi determinada a capacidade de água disponível no solo (CAD, Equação 4), considerando a profundidade (z , em mm) do sistema radicular (Bergamaschi et al., 1992).

$$AD = CC - PMP \quad \text{Eq. 3}$$

$$CAD = (CC - PMP) z \quad \text{Eq. 4}$$

2.5. Resistência do solo à penetração

A resistência que o solo oferece à penetração (RP) foi determinada em cada amostra logo após a aplicação das sucções de 2, 4, 6, 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa. Para tanto foi utilizado um penetrógrafo digital de bancada da marca Marconi, modelo MA 933. Esse procedimento foi realizado por meio de uma haste metálica com um cone na sua extremidade com ângulo de penetração de 45°. Após a análise, os dados referentes a força (kgf) necessária para penetrar o solo foram convertidos para MPa (equações 5, 6 e 7) (SILVA et al., 2017).

$$RP = \frac{Fg}{\left[\frac{\pi r^2}{\cos(45^\circ)} \right]} \frac{1}{10^6} \quad \text{Eq. 5}$$

$$RP = \frac{9,806648 F}{\left[\frac{3,1415926 \times 0,00192^2}{0,7071} \right]} \frac{1}{10^6} \quad \text{Eq. 6}$$

$$RP = 0,598755 F \quad \text{Eq. 7}$$

em que RP é a resistência à penetração das raízes em MPa, F o valor de resistência dada pelo aparelho em kgf, g a aceleração da gravidade 9,806648 m s⁻², π cujo o valor é 3,1415926 (adimensional), r é o raio da ponteira (0,00192 m), e cos(45°) é relativo ao ângulo da superfície do cone (0,7071).

Depois de obtidos os valores de RP em MPa, foi confeccionado os gráficos relacionando a força de sucção o de água no solo com a RP, conforme a Equação 8.

$$RP = a h^b \quad \text{Eq. 8}$$

em que RP é a resistência que o solo à penetração das raízes (MPa), h é o valor de sucção da água (kPa), a e b são parâmetros empíricos da equação.

Intervalo hídrico ótimo

O Intervalo hídrico ótimo (IHO) foi obtido a partir da integração dos dados de densidade do solo (Ds); resistência à penetração (RP); teor (θ) e sucção da água (ψ). Para confecção do IHO foi ajustada a curva de retenção de água (CRA) e a curva de resistência do solo à penetração (CRS). Sendo que para CRA foi incorporado o efeito da Ds na relação funcional entre θ e ψ , e o ajuste foi feito utilizando o modelo empregado por Leão et al. (2006) (Equação 9).

$$\theta = \text{Exp}(a + b Ds) \Psi^c \quad \text{Eq. 9}$$

Para a CRS foi incorporado o efeito da Ds na relação funcional entre RP e θ , e o ajuste ao modelo não linear foi feito de acordo com procedimento descrito por Silva et al. (1994) (Equação 10).

$$RP = d \theta^e Ds^f \quad \text{Eq. 10}$$

em que θ é o conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); ψ é o valor de sucção da água do solo (MPa); RP é a resistência que o solo à penetração, em MPa; e a, b, c, d, e, f são coeficientes obtidos no ajuste dos dados às equações.

O IHO foi determinado segundo a metodologia descrita por Silva et al. (2015), com substituição do ponto de murcha permanente pela umidade crítica para a cultura. A determinação da umidade em que RP é limitante (θ_{RP}) foi realizada a partir da CRS, considerando-se 3,0 MPa como limite crítico ao crescimento radicular do cafeeiro (EHLERS et al.; 1983; SERAFIM et al., 2013). A umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) foi estimada quando o solo foi submetido à sucção de 6 kPa (SILVA et al., 2014), e a umidade crítica ao desenvolvimento do cafeeiro ($\theta_{\text{Crítico}}$) foi obtida segundo sugestão de Silva et al. (2015), que consideraram como 0,5 o fator de utilização da capacidade de água disponível no solo para manutenção das relações hídricas. A umidade que garante uma porosidade de aeração mínima de $0,10 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (θ_{PA}) foi obtida pela equação 7 (Equação 11).

$$\theta_{PA} = [VTP - 0,10] \quad \text{Eq. 11}$$

O IHO foi então determinado para cada localidade e horizonte do solo amostrados, com base nos valores das funções θ_{CC} , $\theta_{\text{Crítico}}$, θ_{PA} e θ_{RP} . Para a seleção de valores de θ utilizados no cálculo do IHO, adotou-se o método empregado por Silva et al. (1994), no entanto, com incorporação do $\theta_{\text{Crítico}}$, conforme as situações:

$$\text{Se } \theta_{PA} \geq \theta_{CC} \text{ e } \theta_{RP} \leq \theta_{\text{Crítico}} \therefore \text{IHO} = \theta_{CC} - \theta_{\text{Crítico}};$$

$$\text{Se } \theta_{PA} \geq \theta_{CC} \text{ e } \theta_{RP} \geq \theta_{\text{Crítico}} \therefore \text{IHO} = \theta_{CC} - \theta_{RP};$$

$$\text{Se } \theta_{PA} \leq \theta_{CC} \text{ e } \theta_{RP} \leq \theta_{\text{Crítico}} \therefore \text{IHO} = \theta_{PA} - \theta_{\text{Crítico}};$$

$$\text{Se } \theta_{PA} \leq \theta_{CC} \text{ e } \theta_{RP} \geq \theta_{\text{Crítico}} \therefore \text{IHO} = \theta_{PA} - \theta_{RP}.$$

2.6. Recursos computacionais

Os parâmetros dos modelos do IHO, CRA e CRP foram estimados pelo método dos mínimos quadrados para modelos não lineares (RITZ e STREIBIG, 2008) por meio da função `nls` do software R (R CORE TEAM, 2017) e os valores iniciais, necessários para a obtenção das estimativas dos parâmetros, foram obtidos por meio do método gráfico iterativo em regressão não linear utilizando-se o pacote *manipulate* (R CORE TEAM, 2017).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Porosidade do solo

A macroporosidade observada nos horizontes A e BA do LAdx é de apenas 10% e 9%, respectivamente (Tabela 2). No LVAd, o horizonte A apresentou volume de macroporos de 13%, mas no horizonte BA deste solo esta porosidade é também limitada, apresentando volume de apenas 10% (Tabela 2).

Essa situação requer atenção, sobretudo no LAdx, visto que a macroporosidade é fundamental na aeração dos solos, e valores abaixo de 10% são considerados restritivos para o adequado desenvolvimento das plantas (VOMOCIL & FLOCKER, 1966; WATANABE et al., 2002). Portanto, estes solos podem apresentar em algum momento limitações sérias se forem mal manejados, particularmente quando se prevê todos os microporos cheios de água

com o uso de irrigação, liberando somente os macroporos para a aeração (BONOMO et al., 2014; SILVA et al., 2014). Nessas situações, somente a macroporosidade não atenderá a demanda por aeração das plantas, sendo necessário que um percentual dos microporos esteja vazio.

3.2. *Água disponível, densidade e análise visual do perfil do solo*

A água disponível para as plantas (AD), nos horizontes estudados do LAdx e LVAd variou de 8 a 10% (Tabela 2), valores esses considerados como sendo médios de acordo com o Bureau of Reclamation (USA, 1953). Todavia, as raízes do cafeeiro vêm explorando apenas a camada superficial do solo (Figura 2), o armazenamento de água disponível para as plantas seria 44,0 e 34,8 mm para o LAdx e LVAd, respectivamente (Tabela 2).

Entretanto, se fossem tomadas medidas que viabilizassem a exploração do horizonte subsuperficial (BA) pelas raízes (a exemplo da subsolagem), o armazenamento passaria para 119,75 (44,0 + 75,75) e 112,8 mm (34,8 + 78,0), respectivamente (Tabela 2). Esse ganho corresponderia a um aumento de 173 e 223% para o LAdx e LVAd, respectivamente, o que traria consequências positivas com redução na frequência das irrigações.

A densidade do solo (Ds) encontrada variou de 1,61 (A) a 1,65 kg dm⁻³ (BA) no LAdx e de 1,43 (A) a 1,55 kg dm⁻³ (BA) para o LVAd. Tais resultados são preocupantes, pois em estudo de intervalo hídrico ótimo e densidade crítica em um Latossolo Amarelo coeso realizado por Dias et al. (2016), foi verificado que valores de densidade acima de 1,55 kg dm⁻³ em solos com 20 a 55 % de argila podem condicionar limitações ao desenvolvimento de raízes de plantas cultivadas. Resultados similares foram obtidos por Severiano et al. (2011) em estudo com Latossolos de textura franco-arenosa a franco-argilo-arenosa da região dos cerrados, onde foram sugeridas limitações para o desenvolvimento de plantas para valores de densidade acima de 1,50 kg dm⁻³.

Os valores de Ds encontrados para o LAdx e LVAd são coerentes com observações de campo nas áreas analisadas, tendo em vista que o sistema radicular do cafeeiro foi encontrado

na sua grande maioria restrito aos horizontes A e AB (Figura 2B e 2D). Esse fato pode ser justificado na profundidade de preparo do sulco de plantio, mas também na irrigação que mantém as raízes mais superficiais. Porém, é importante destacar que estando o solo mais úmido, a coesão tende a causar menos restrições, pois a consistência do solo é dura quando seco, porém é friável e firme quando úmido, propiciando melhores condições para o desenvolvimento das raízes.

Foi constatada presença de raízes se estendendo lateralmente no horizonte A do LAdx, e raras no horizonte BA. O crescimento lateral das raízes na direção das entrelinhas (Figura 2B) pode ter ocorrido em função do tipo de irrigação utilizado (aspersão) que recobre uma maior área, reduzindo assim a resistência ao desenvolvimento de raízes em função do aumento da umidade (Figura 4).

Avaliando a distribuição de raízes do cafeeiro em Latossolo Amarelo dos tabuleiros costeiros na Bahia, Covre et al. (2015) observaram em áreas irrigadas por gotejamento, maior comprimento, volume e área superficial de raízes, que, no entanto, não ultrapassaram 20 cm no sentido da entrelinha. O menor desenvolvimento de raízes foi justificado pelos autores como sendo devido à baixa fertilidade e/ou maior densidade do solo.

No LVAd onde a irrigação é feita por gotejamento, verificou-se forte umedecimento até o horizonte BA, porém com uma baixa densidade radicular neste horizonte (Figura 2D). Existe a possibilidade neste caso de a irrigação estar sendo excessiva e assim promovendo uma diminuição do fluxo difusivo de oxigênio em razão da baixa aeração nestas condições, sugerido pela macroporosidade menor que 10% (Tabela 2). Segundo observação do proprietário cafeeicultor, presente no local no momento do estudo do perfil, existe a possibilidade de ocorrência de falhas na irrigação, tendo em vista a produtividade da cultura estar muito aquém do esperado.

Condições de alta umidade no bulbo irrigado podem limitar as trocas gasosas, dificultando a saída do etileno (oriundo das raízes) pelos poros do solo, permitindo a concentração em níveis suficientes para retardar o desenvolvimento radicular (RENA & GUIMARÃES, 2000; BARRETO et al., 2006).

3.3. Retenção de água no solo

Ao analisar as curvas de retenção de água (CRA) do LAdx, nota-se que não há diferença entre os horizontes estudados (Figura 3). No LVAd foi verificado que o horizonte A apresenta maior retenção de água em comparação ao BA (Figura 3).

A diferença observada coincide com o diagnóstico qualitativo da estrutura entre os horizontes no mesmo solo, realizado em campo. A maior amplitude e inclinação da CRA para o LVAd permite inferir uma distribuição de poros por tamanho mais heterogênea, o que sugere melhor qualidade estrutural para o crescimento de raízes (DEXTER, 2004; SILVA et al., 2012).

A restrição ao desenvolvimento radicular em solos adensados normalmente se dá na condição de solo seco. Assim a análise da resistência a penetração no solo em função das sucções de água no solo, permite determinar em quais valores de sucção de água o solo é mais restritivo ao desenvolvimento radicular do cafeeiro (Figura 4).

3.4. Resistência do solo à penetração

Para ambos os solos e seus horizontes foi observado um crescimento exponencial da resistência a penetração a medida que aumenta a força de sucção de água no solo, ou seja, a medida que o solo seca (Figura 4). Os valores baixos de RP em condições de maior umidade para estes solos devem-se ao efeito lubrificante da água, que reduz a coesão entre as partículas do solo (MOREIRA et al., 2014). Assim, a medida que há uma diminuição na umidade do solo (valores mais altos de sucção de água no solo) ocorre maior contato ou fricção entre as partículas resultando em um aumento exponencial da RP (TORMENA et al., 2007).

Observa-se que não há diferença no comportamento do LAdx quanto à resistência a penetração (RP) entre os horizontes A e BA (Figura 4) salientando que o valor restritivo já é alcançado quando o solo se encontra sob tensões próximas de 33 kPa. Para o LVAd a diferença entre horizontes é marcante, pois enquanto no horizonte BA aquele valor de resistência é alcançado quando a sucção de água no solo se aproxima de 100 kPa, no horizonte A aquele valor somente é atingido quando a sucção supera 500 kPa. Salienta-se, entretanto que estas informações precisam ser complementadas com dados de umidade no solo.

A RP quando analisada conjuntamente com valores de umidade tem sido eficaz em diferenciar efeitos de manejos para o cafeeiro conilon (PARTELLI et al., 2016). Valores de RP superiores a 3,0 MPa tem sido considerado como limitantes ao desenvolvimento do sistema radicular do cafeeiro (SERAFIM et al., 2013). Adotando esse valor como limitante, observa-se que para o LAdx o desenvolvimento radicular do cafeeiro passaria a sofrer restrições em umidades inferiores a 0,251 e 0,240 $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ (correspondentes às tensões de 70 e 42 kPa), respectivamente, para os horizontes A e BA (Figura 3 e Figura 4). Para o LVAd o valor limitante para RP corresponde às umidades de 0,232 e 0,250 $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ (relacionadas às tensões de água de 500 e 76 kPa), respectivamente para os horizontes A e BA (Figura 3 e Figura 4).

3.5. Intervalo hídrico ótimo

O que se observa é que o manejo da irrigação para estes solos é muito delicado, uma vez que a faixa de exploração de água disponível pelas raízes das plantas é limitada pela RP, não mais correspondendo aos limites de θ_{CC} e θ_{PMP} como utilizado no cálculo da CAD (Equação 4, Tabela 2). Portanto, a restrição ao desenvolvimento radicular da planta em uma condição de solo mais seco, influenciaria no intervalo da CAD destes solos, remetendo a

irrigações mais frequentes e exigindo maior gasto de energia com bomba e maior mão-de-obra.

A faixa de umidade no solo com menos restrições para o desenvolvimento da planta (IHO) está apresentada na Figura 5. Para o LAdx, verifica-se que para situações em que a D_s for inferior a $1,60 \text{ kg dm}^{-3}$, a faixa de umidade volumétrica no solo entre $0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ($\theta_{\text{Crítico}}$) e $0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (θ_{CC}) não apresenta limitações físicas de aeração ou resistência a penetração. Nessa situação, portanto, melhorias no manejo da irrigação podem ser realizadas para manter a umidade nessa faixa, para se alcançar maior produtividade.

Para D_s acima de $1,60 \text{ kg dm}^{-3}$, a RP bem como a aeração passam a ser fatores preocupantes. A umidade deverá estar acima da umidade crítica (acima de $0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) para que o crescimento da raiz não seja limitado pela RP. Por outro lado, deverá estar abaixo da capacidade de campo (entre $0,28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,29 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) (Figura 5) para que haja aeração adequada. Neste caso o problema tende a se agravar, particularmente pelo fato de que normalmente o irrigante não sabe o que está acontecendo, e muitas das vezes observa que a produtividade de sua lavoura está diminuindo sem causa aparente.

Para o LVAd, a situação é relativamente melhor, tendo em vista uma maior amplitude de D_s . Até a D_s de $1,56 \text{ kg dm}^{-3}$ a faixa de umidade com menos limitações físicas determinadas pelo IHO ficam limitada pelos θ_{CC} e $\theta_{\text{Crítico}}$. Acima de $1,52 \text{ kg dm}^{-3}$ a RP passa a ser o limite inferior do IHO, e quando a mesma atingir $1,56 \text{ kg dm}^{-3}$ a aeração também passa a ser limitante (Figura 5). Assim, para se obter uma faixa mais ampla de umidade no solo com mínimas limitações para as plantas, o manejo idealmente deve ser norteado no sentido de manter os solos com D_s abaixo de $1,60$ e $1,52 \text{ kg dm}^{-3}$ para o LVAx e LVAd, respectivamente.

A apresentação do intervalo de confiança para D_s (IC_{D_s}) permite diagnosticar a condição estrutural dominante no momento da avaliação (SERAFIM et al., 2013; SILVA et

al., 2015). A partir dos valores IC_{Ds} , observa-se que, à exceção do horizonte A do LVAd, todos os demais horizontes apresentam problemas quanto a RP e aeração, chegando a situações extremas, como a do horizonte BA do LAdx cujo o IC_{Ds} coincide com o IHO igual a zero. Portanto, tanto a RP como a falta de oxigênio vão limitar o desenvolvimento das raízes do cafeeiro nesse solo, independente da umidade, o que leva a prejuízos tendo impacto negativo na produtividade da cultura.

Para se conhecer a intensidade das limitações físicas relacionadas à faixa de umidade no solo na CAD, utilizou-se a D_s média para cada solo e horizontes estudados, e assim foi calculada a faixa de água disponível obtida segundo o IHO para os perfis avaliados (CAD_{IHO}). Deste modo, comparando a CAD_{IHO} com a CAD calculada (Tabela 2), verificou-se redução de 44,00 mm para 23,38 mm, para os horizontes A + AB e de 75,75 mm para praticamente 0 mm no horizonte BA no LAdx,. O uso da CAD_{IHO} é mais coerente por abordar conceitos de aeração e RP.

Para o LVAd foi observada redução de 34,80 mm para 31,20 mm nos horizontes A+ AB, e de 78,00 mm para 45,75 mm no horizonte BA, e, portanto, muito menor que a observada no LAdx. Nesse contexto, depreende-se que o aprofundamento radicular no LAdx esbarra em limitações físicas muito mais severas quando comparado ao LVAd.

Segundo Silva et al. (1994), a densidade do solo crítica (D_{sc}) no intervalo hídrico ótimo (IHO) é alcançada quando o valor do limite superior é igual ao limite inferior. Neste sentido, observa-se que os valores de D_{sc} para o LAdx e LVAd foram 1,64 e 1,63 $kg\ dm^{-3}$, respectivamente (Figura 5), sugerindo necessidade de manejo diferenciado nos solos em estudo.

Dentre as alternativas de manejo para atender àquelas condições cita-se o emprego da subsolagem. O uso dessa técnica proporciona benefícios à cultura, visto que, a mesma proporciona rompimento da camada coesa, reduzindo a RP e, aumento no volume de solo

ocupado pelas raízes (SOUZA et al., 2006), resultando em uma maior disponibilidade de água para as plantas, em função da possibilidade da exploração de maior profundidade de solo pelas raízes, como observado para citros em solos dos tabuleiros costeiros (SOUZA et al., 2004).

Por outro lado, sem irrigação é praticamente impossível “produtividade de café” nestes solos, agravado pela ocorrência contínua de déficits hídricos na região (BONOMO et al., 2014). A falta de água no solo agrava ainda mais o problema da RP, mesmo na condição de solo sob déficit hídrico moderado.

Há de se salientar, entretanto, que o excesso de água nesses solos pode acometer redução da aeração, pois os mesmos possuem um pequeno volume de macroporos, sobretudo nos horizontes subsuperficiais. Dessa forma, mesmo com suprimento de água adequado, problemas físicos podem limitar o potencial de produtividade da cultura.

Desta forma, como recomendação técnica nestas áreas já implantadas e irrigadas, sugere-se um melhor uso da água por meio da definição do momento e quantidade a aplicar, com auxílio de sensores de umidade ou de sucção, considerando a faixa de umidade no solo delimitada pelo IHO.

Um ponto importante sobre a irrigação do cafeeiro é a distribuição espacial do sistema radicular no solo (PARTELLI et al., 2014; COVRE et al., 2015). Deste modo, em razão da dificuldade no aprofundamento radicular do cafeeiro, em função de limitações físicas desses solos, uma alternativa a ser buscada é o aumento do desenvolvimento das raízes lateralmente. Para o cafeeiro Conillon sob irrigação por aspersão, Covre et al. (2015) observaram raízes avançando 0,70 m para cada lado na entrelinha e 0,33 m para cada lado no sentido da linha, enquanto Partelli et al. (2014) observaram percentual superior a 90% de raízes no volume correspondente a camada de 0,50 m do solo, muito próximo, portanto, dos 0,55 m encontrados neste trabalho.

Com base no exposto acima (café irrigado por aspersão), o cafeeiro da área em questão poderia explorar uma área de $0,924 \text{ m}^2$ ($0,66 \times 1,40 \text{ m}$) e como a CAD_{IHO} deste solo é de $23,88 \text{ mm}$, ou seja $23,88 \text{ l m}^{-2}$, e, portanto, ele teria à sua disposição uma capacidade de $22,1$ litros de água em uma camada de $0,55 \text{ m}$ (horizontes A+AB). Para a irrigação por gotejo, segundo Covre et al. (2015), as raízes podem chegar somente a $0,20 \text{ m}$ de cada lado da entrelinha e $0,17 \text{ m}$ de cada lado da linha, e assim, o cafeeiro ocuparia no LAdx uma área de apenas $0,136 \text{ m}^2$ de solo e a planta teria à sua disposição, com base no IHO, um reservatório de apenas $3,25$ litros de água, considerando a mesma camada explorada pelas raízes.

No LVAd, considerando que as raízes também podem ocupar a mesma área de $0,924 \text{ m}^2$ na condição de solo irrigado por aspersão e apenas $0,136 \text{ m}^2$ na condição de solo irrigado por gotejamento, com base no IHO as plantas teriam à sua disposição um reservatório de $28,8$ e apenas $4,24$ litros, para irrigação por aspersão e gotejamento, respectivamente, em uma camada de $0,40 \text{ m}$. Deste modo a opção pela irrigação por aspersão nesses solos pode proporcionar um aumento no aproveitamento de água em até sete vezes.

Por outro lado, considerando a possibilidade de adubação e irrigação em área total, e um espaçamento entrelinhas de 3 m , a área explorada pelas raízes seria $1,98 \text{ m}^2$, resultando em um volume de $47,3$ e $61,8$ litros de água para o LAdx e LVAd, respectivamente.

Em resumo, pode-se separar duas situações: uma primeira em que o cafeeiro já está implantando e uma segunda em que está em implantação. Para a primeira, sugere-se irrigação e adubação em área total para estimular o enraizamento também na entrelinha, ocupando assim todo o horizonte A, podendo-se previamente a este manejo, inclusive, subsolar o solo nas entre linhas. Na segunda situação, é possível sugerir uma subsolagem na linha de plantio para ultrapassar a camada coesa viando o aprofundamento radicular. Nessa situação sugere-se também a irrigação e adubação em área total, visando maior volume de solo explorado e assim maior eficiência do uso da água.

4. CONCLUSÕES

A estreita faixa de água disponível para as plantas nos Latossolos adensados exige um adequado manejo do solo para aumentar a eficiência da irrigação, melhorando o aproveitamento dos recursos de água para as plantas.

O intervalo hídrico ótimo permitiu identificar a faixa de umidade em que a irrigação deve ser manejada para que a planta expresse o seu máximo potencial produtivo.

O Latossolo Amarelo Distrocoeso se mostrou como o mais limitante ao desenvolvimento das raízes do cafeeiro.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão de bolsa de doutorado, a CAPES, FAPEMIG e Consórcio Embrapa Café pelo apoio financeiro. À UFLA e DCS pelo apoio científico.

6. REFERENCIAS

ASSIS, R. L.; LAZARINI, G. D.; LANCAS, K. P.; CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 558-568, 2009.

BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R.; FONTANA, D. C.; CUNHA, G. R.; SANTOS, M. L. V.; FARIAS, J. R. B.; BARNI, N. A. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1992. 125p.

BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A. C. A.; TORMENA, C. A.; FOLEGATTI, M. V.; GUIMARÃES, R.M.L. Intervalo hídrico ótimo num Nitossolo Vermelho Distroférrico irrigado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 273-281, 2009.

BONOMO, D. Z.; BONOMO, R.; PEZZOPANE, J. R. M.; SOUZA, J. M. Alternativas de manejo de água de irrigação em cultivos de conilon. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 4, p. 537 - 545, 2014.

CASTRO, F. S.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; XAVIER, A. C. Zoneamento agroclimático para espécies do gênero Pinus no estado do Espírito Santo. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 235-250, 2010.

CINTRA, F. L. D.; RESENDE, R. S.; LEAL, M. L. S.; PORTELA, J. C. Efeito de volumes de água de irrigação no regime hídrico de solo coeso dos tabuleiros e na produção de coqueiro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p.1041-1051, 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **1º Levantamento da safra brasileira de café – Safra 2018**, Brasília, v. 5, n. 1, p. 1-73, 2018. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 20/01/2018.

COVRE, A. M.; PARTELLI, F. L.; GONTIJO, I.; ZUCOLOTO, M. Distribuição do sistema radicular de cafeeiro conilon irrigado e não irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 11, p.1006-1016, 2015.

DIAS, C. B.; ROCHA, G. C.; ASSIS, I. R.; FERNANDES, R. B. A. Intervalo hídrico ótimo e densidade crítica de um Latossolo Amarelo coeso sob diferentes usos no ecossistema Tabuleiro Costeiro. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 63, n. 6, p. 868-878, 2016.

EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F.; BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 3, n. 3, p. 261-275, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. 3 edth revisada e ampliada. Rio de Janeiro, 2017. 573p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 edth. Brasília, 2013. 353p.

FERREIRA, C. J. B.; ZOTARELLI, L.; TORMENA, C. A.; RENS, L. R.; ROWLAND, D. L. Effects of water table management on least limiting water range and potato root growth. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 186, n. 1, p. 1-11, 2017.

FERREIRA, M. M; FERNANDES, B; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 515-524. 1999.

GALEANO, E. A. V.; BORGES, V. A. J.; OLIVEIRA, L. R.; FERRÃO, R. G. Consolidação das estatísticas agropecuárias de 2015 e previsão da produção agrícola para 2016. **Boletim da Conjuntura Agropecuária Capixaba**, Vitória, v. 1, n. 5, p. 3-17, 2016.

GATHALA, M. K.; LADHA, J. K.; SAHARAWAT, Y. S.; KUMAR, V.; KUMAR, V.; SHARMA, P. K. Effect of tillage and crop establishment methods on physical properties of a medium-textured soil under a seven-year rice-wheat rotation. **Soil Science Society of America Journal**. v. 75, n. 1, p. 1851-1862, 2011.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. **Scientia Agricola**. Piracicaba, v. 59, n. 3, p. 613-620, 2002.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 17-40. 1997.

LEAO, T. P.; DA SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, n. 1, v. 88, p. 279–285, 2006.

LIMA, H. V.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; et al. Index of soil physical quality of hardsetting soils on the Brazilian coast. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1722-1730, 2014.

MOREAU, A. M. S. S.; COSTA, L. M.; KER, J. C.; GOMES, F. H. Gênese de horizonte coeso, fragipã e duripã em solos do Tabuleiro Costeiro do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 1021-1030, 2006.

MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; JUNIOR, E. B.; FIGUEIREDO, G. C.; DA SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B. Quantificação do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho utilizando duas estratégias metodológicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 1772-1783, 2014.

PARTELLI, F. L.; COVRE, A. M.; OLIVEIRA, M. G.; ALEXANDRE, R. S.; VITÓRIA, E. L.; SILVA, M. B. da. Root system distribution and yield of 'Conilon' coffee propagated by seeds or cuttings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 5, p.349-355, 2014.

PARTELLI, F. L.; VALICHESKI, R. R.; VIEIRA, H. D.; GONTIJO, I.; BRITO, F. E. P. Physical soil attributes of Conilon coffee (*Coffea canephora*) under organic and conventional management systems. **Australian Journal of Crop Science**, Brisbane, v. 10, n. 5, p. 646-653, 2016.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology Earth System Sciences**, Gottingen, v. 11, n. 5, p. 1633–1644, 2007.

PEZZOPANE, J. R. M.; CASTRO, F. S.; PEZZOPANE, J. E. M.; BONOMO, R.; SARAIVA, G. S. Zoneamento de risco climático para a cultura do café Conilon no Estado do Espírito Santo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.41, n.3, p.341- 348, 2010.

R CORE TEAM: **A language and environment for statistical computing**, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2017, URL: <http://www.R-project.org/>.

RITZ, C.; STREIBIG, J. C. **Nonlinear regression with R**. Springer Science. edth, New York, 2008, 148 p.

SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; VITORINO, A. C. T.; SILVA, B. M.; CARDUCCI, C. E. Qualidade física e intervalo hídrico ótimo em Latossolo e Cambissolo, cultivados com cafeeiro, sob manejo conservacionista do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 733-742, 2013.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; COSTA, K. A. P.; SILVA, F. G.; FERREIRA FILHO, S. M. Structural changes in Latosols representative of the Cerrado Region: I - Relationships between soil physical attributes and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 773-782, 2011.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA, E. A.; FERREIRA, M. M.; NORTON, L. D.; CURTI, N. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic Latosol as affected by soil management. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 154, n. 1, p. 103-113, 2015.

SILVA, R. F.; SANTOS, G. G.; NÓBREGA, J. C. A.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS, B. O.; SANTOS, D. P.; SILVA JÚNIOR, J. P. Impacts of land-use and management systems on organic carbon and water-physical properties of a Latossolo Amarelo (Oxisol). **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 38, n. 1, p. 109-124, 2017.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12th ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service; 2014.

SOUZA, J. M.; BONOMO, R.; PIRES, F. R.; BONOMO, D. Z. Curva de retenção de água e condutividade hidráulica do solo em lavoura de café conilon submetida à subsolagem. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 226-236, 2014.

SOUZA, L. D.; RIBEIRO, L. S.; SOUZA, L. S.; LEDO, C. A. S.; CUNHA SOBRINHO, A. P. Distribuição das raízes dos citros em função da profundidade da cova de plantio em Latossolo Amarelo dos Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 87-91, 2006.

SOUZA, L. D.; SOUZA, L. S.; LEDO, C. A. S. Disponibilidade de água em pomar de citros submetido a poda e subsolagem em Latossolo Amarelo dos Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 69-73, 2004.

SOUZA, L. S. Aspectos sobre uso e manejo dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, n. 1, p. 34-39, 1997.

TORMENA, C. A.; ARAUJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, M. J. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 211-19, 2007.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 573-581, 1998.

USA - BUREAU OF RECLAMATION. **Irrigated land use classification**. In: BUREAU of reclamation manual. S. l., 1953. v.5.

VAN GENUTCHEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 55, p. 892-898, 1980.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect os soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 4, n. 1, p. 242-246, 1961.

WATANABE, S. H.; TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; VIDIGAL FILHO, O. S.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; MUNIZ, A. S. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico influenciadas por sistemas de preparo do solo utilizados para implantação da cultura da mandioca. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1255-1264, 2002.

Tabela 1. Divisão unitária das partículas por tamanho para o Latossolo Amarelo Distrocoeso (LAdx) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd).

Solo	Horizonte	Divisão frações texturais em % ⁽¹⁾						
		AMG	AG	AM	AF	AMF	Silte	Argila
LAdx	A	5	11	18	15	7	5	39
	BA	5	13	14	13	5	6	44
LVAd	A	5	15	22	11	3	5	39
	BA	7	16	14	9	3	6	45

⁽¹⁾ Classes de textura: AMG = Areia muito grossa, AG = Areia grossa, AM = Areia média, AF = areia fina, AMF = Areia muito fina.

Tabela 2. Atributos físico-hídricos de dois Latossolos sob cafeeiro irrigado nos municípios de São Mateus e Jaguaré na região norte do Espírito Santo, Brasil.

Horizonte	P ---m---	Ds --kg dm ⁻³ --	Dp	θ_s	θ_{CC}	θ_{PMP}	Ma	AD	CAD --mm--
Latossolo Amarelo Distrocoeso ¹									
A	0,30 (0,55*)	1,61	2,70	0,404	0,301	0,221	0,103	0,080	44,00
BA	0,75	1,65	2,71	0,387	0,298	0,197	0,089	0,101	75,75
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico ²									
A	0,23 (0,40*)	1,43	2,72	0,477	0,348	0,261	0,129	0,087	34,80
BA	0,75	1,55	2,71	0,424	0,326	0,222	0,098	0,104	78,00

¹Área sob café irrigado por aspersão. ²Área sob café irrigado por gotejamento. *Profundidade utilizada no cálculo da CAD (horizontes A+AB). P = Profundidade, Ds = Densidade do solo, Dp = Densidade de partículas, θ_s = Umidade de saturação, θ_{PMP} = Umidade no ponto de murcha permanente, θ_{CC} = Umidade na capacidade de campo, Ma = Macroporosidade, AD = Água disponível, CAD = Capacidade de água disponível.

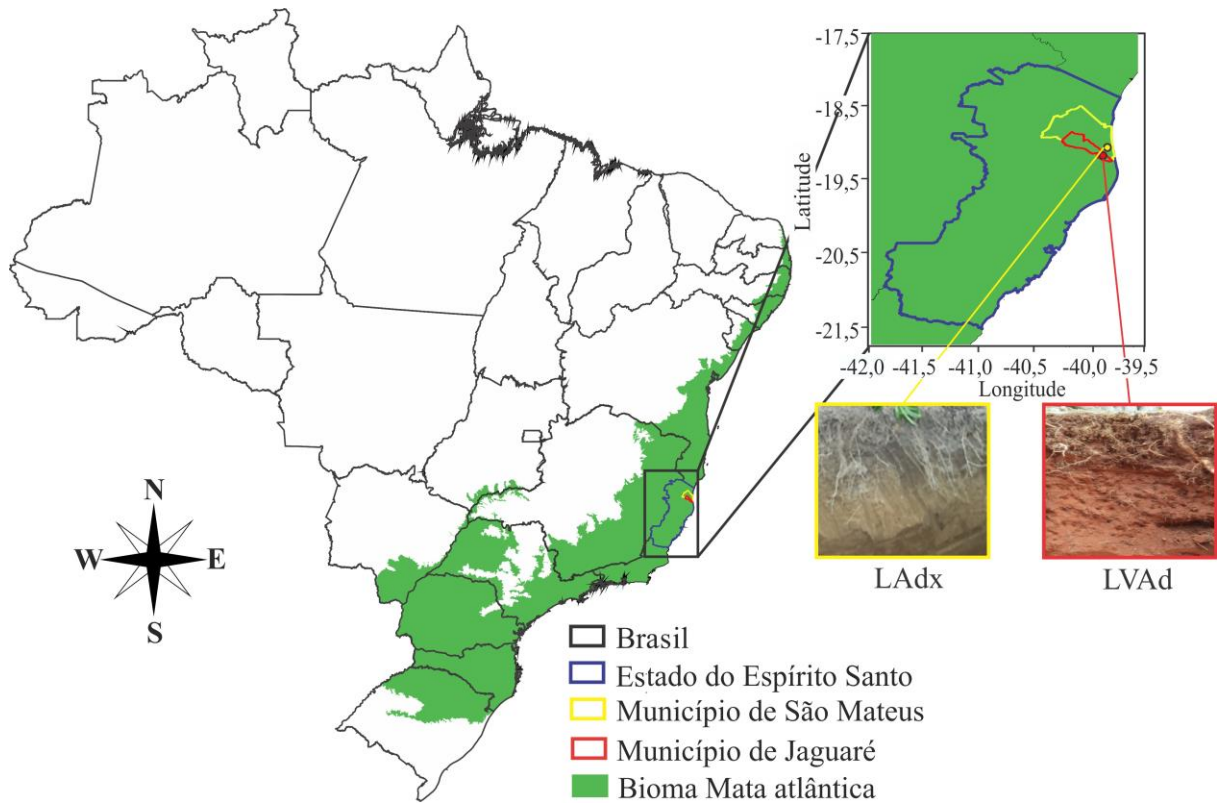


Figura 1. Localização das áreas de estudo, nos municípios de São Mateus e Jaguaré no norte do estado do Espírito Santo, Brasil. Classes de solos estudadas: Latossolo Amarelo Distrocoeso (LAdx) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd).



Figura 2. Paisagem e perfil do Latossolo Amarelo Distrocoeso (LAdx) irrigado por aspersão em São Mateus – ES (A e B) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd) irrigado por gotejamento em Jaguaré – ES (C e D).

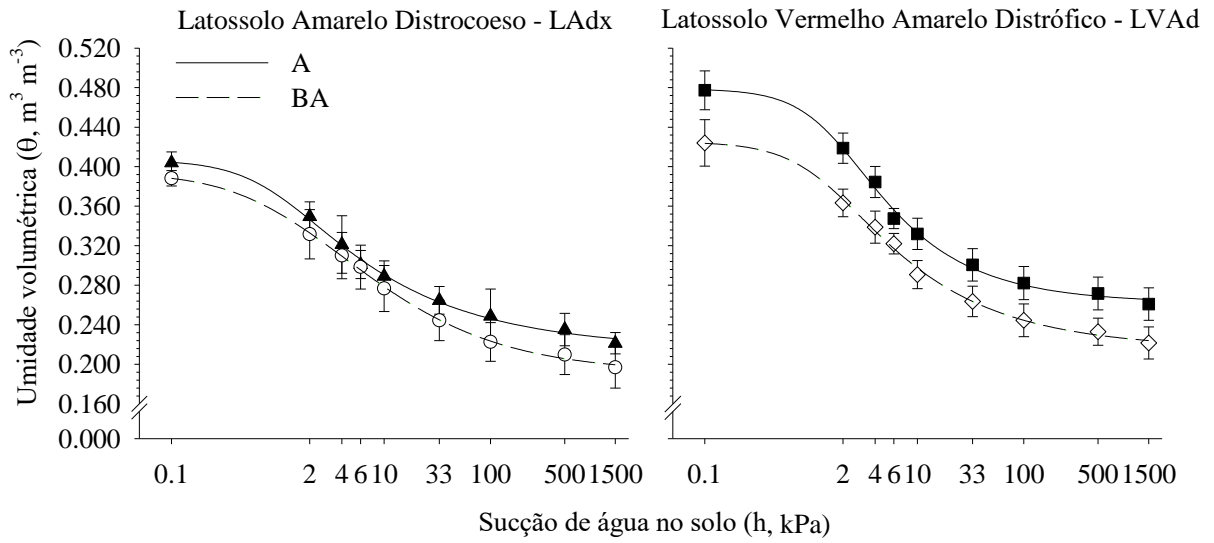


Figura 3. Curva de retenção de água de dois solos sob cafeeiro irrigado nos municípios de São Mateus e Jaguaré na região norte do Espírito Santo, Brasil.

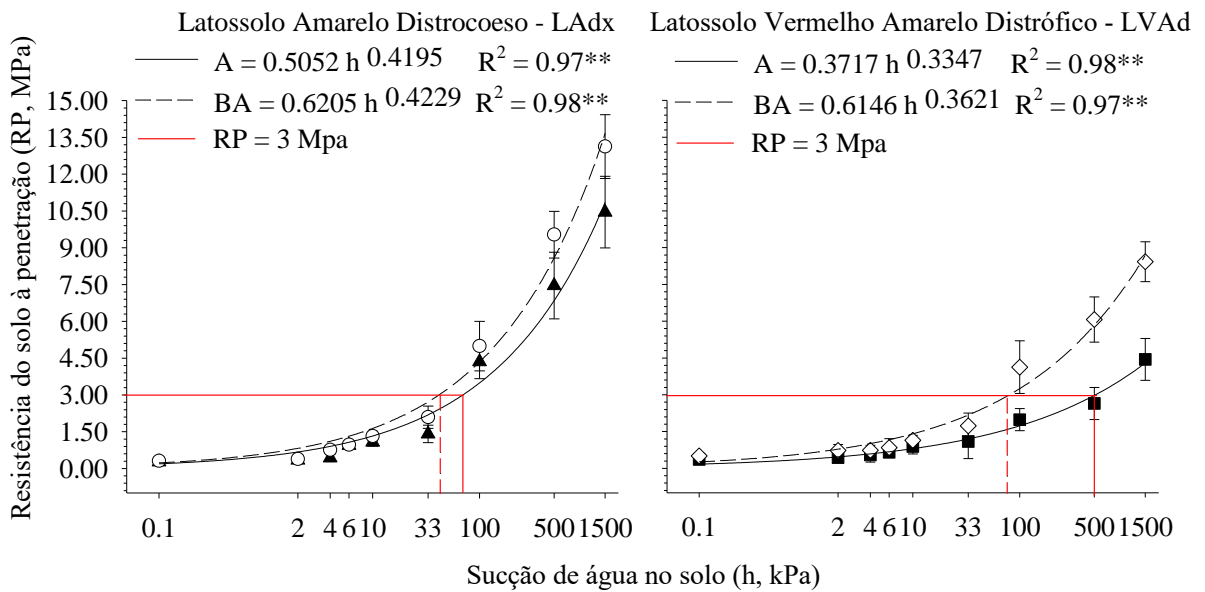


Figura 4. Relação entre sucção de água no solo e resistência à penetração em dois solos sob cafeeiro irrigado nos municípios de São Mateus e Jaguaré na região norte do Espírito Santo, Brasil Níveis de significância pelo teste F: ** (p < 0,01).

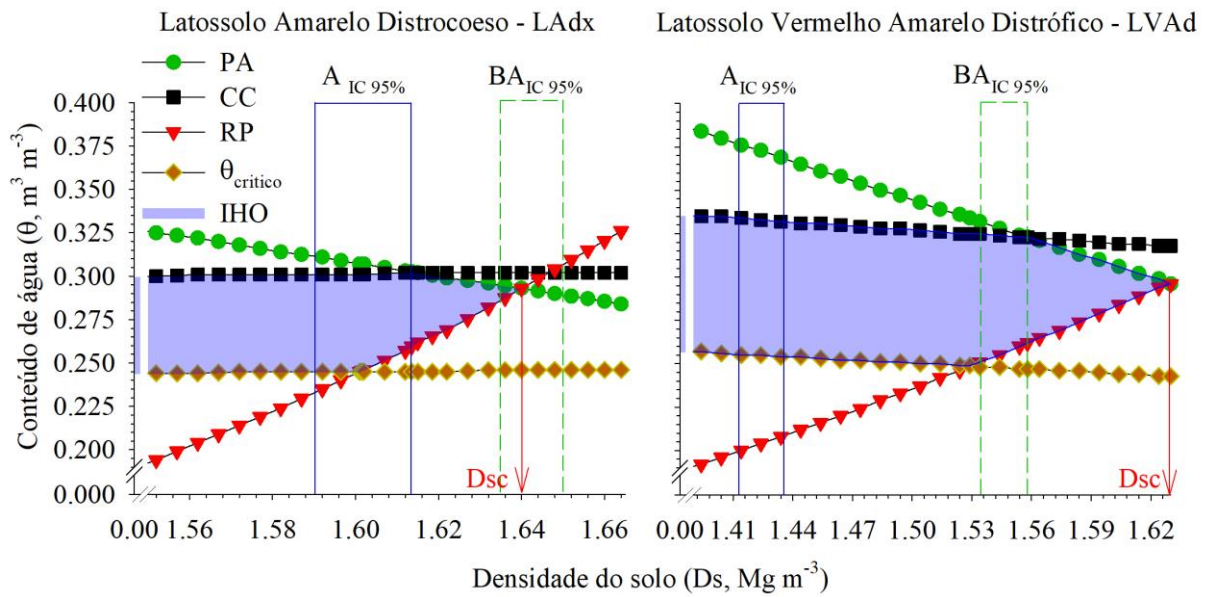


Figura 5. Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) em dois solos sob cafeeiro irrigado nos municípios de São Mateus e Jaguaré na região norte do Espírito Santo, Brasil. PA: Porosidade de aeração mínima de $0,10 m^3 m^{-3}$; CC: Capacidade de campo na sucção de 6 kPa; RP: Resistência à penetração crítica em 3 MPa; $\theta_{Crítico}$: conteúdo de água crítico (uso de 50% da água disponível) abaixo do qual há restrições a atividade transpiratória; Dsc: Densidade do solo crítica quando IHO = 0.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO 2 – Dinâmica da água em Cambissolo submetido a diferentes práticas de manejo na cafeicultura

Artigo de acordo com as normas do periódico científico Soil and Tillage Research

DINÂMICA DA ÁGUA EM CAMBISSOLO SUBMETIDO A DIFERENTES PRÁTICAS DE MANEJO NA CAFEICULTURA

Rodrigo Fonseca da Silva ^{3*}, Samara Martins Barbosa ³, Bruno Montoani Silva ⁴, Sergio

Henrique Godinho Silva ⁴, Geraldo Cesar de Oliveira ⁴

RESUMO: O modo como manejo do solo altera a configuração do espaço poroso com efeito no movimento da água tem sido objeto de vários estudos. Na agricultura, um aspecto muito importante é o entendimento de como o manejo afeta a infiltração, a redistribuição e o armazenamento de água. Em sistemas agrícolas com restrição hídrica, o adequado manejo pode alterar a dinâmica de água e assim o favorecer, visto que, esses fatores influenciam a disponibilidade de água para as plantas. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar sistemas de preparo do solo para implantação de cafeicultura em um Cambissolo, naturalmente adensado e raso, por meio das alterações na configuração da porosidade e nas propriedades hidráulicas do solo, de forma a contribuir para a melhoria da eficiência de água no cultivo. O experimento foi conduzido em área de Cambissolo situada no município de Nazareno, estado de Minas Gerais, Brasil. Foram coletadas amostras de solos em sete profundidades (0, 0,25, 0,35, 0,45, 0,55, 0,65, 0,75) e avaliadas a infiltração de água em diferentes tensões, a condutividade de água em solo saturado, a condutividade de água em solo não saturado e retenção de água. Tais análises foram realizadas em cinco tratamentos, dispostos da seguinte forma: sulco de plantio do café revolvido a 0,40 m de profundidade (PS40); sulco de plantio do café revolvido a 0,60 m de profundidade (PS60); sulco de plantio do café revolvido a 0,80 m de profundidade (PS80); assim como foi avaliada a entrelinha, mantida com cultivo de cobertura de *Brachiaria decumbens* e o Cerrado nativo (CN), que representa a condição de referência. O revolvimento do solo promovido pela enxada rotativa associado à subsolagem nas profundidades de 0,60 m e 0,80 m melhorou a infiltração, armazenamento e movimento de água até 0,50 m de profundidade do Cambissolo. No entanto,

³ Doutorando em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, UFLA, Lavras, MG, Brasil. E-mail: rodrigo11.07@hotmail.com

* Autor para correspondência

⁴ Professor do departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, UFLA, Lavras, MG, Brasil. E-mail:

tanto o sulcador como o subsolador promoveram compactação no solo em camadas localizada abaixo do contato da base de suas hastes.

PALAVRAS-CHAVE: Água no solo, manejo do solo, Cafeicultura em Implantação, porosidade, Geoestatística.

DYNAMICS OF WATER IN HAPLUSTENT SUBMITTED TO DIFFERENT MANAGEMENT PRACTICES IN CAFÉCULTURA

ABSTRACT: The way in which soil management changes the configuration of soil porosity, with effect on water movement, is the subject of several studies involving soil. In agriculture, a very important aspect is the understanding of how management affects the infiltration, redistribution and storage of water. In the agricultural systems with water restriction, the appropriate management can alter the water dynamics and thus favors the same, since, these factors influence the availability of water for the plants. In this context, the objective of this work was to evaluate soil preparation systems for the implantation of coffee cultivation in a Haplustent, naturally adensed and shallow, through alterations in porosity configuration and soil hydraulic properties, in order to contribute to the improvement of water efficiency in cultivation of coffee. The experiment was conducted in Haplustent area, located in the municipality of Nazareno, state of Minas Gerais, Brazil. Soil samples were collected at seven depths (0, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75), in which the evaluated properties were: water infiltration (on the surface of the soil, in different tensions), water conductivity in saturated soil, water conductivity in unsaturated soil and water retention. These analyzes were carried out in five treatments, arranged as follows: planting of coffee in groove at 0,40 m depth (PS40); planting of coffee in groove at 0.60 m depth (PS60); planting of coffee in groove at 0.80 m depth (PS80); between cultivation line, which was maintained *Brachiaria decumbens* cover and native Cerrado (CN) which represents the reference. The soil mix promoted by the rotary hoe associated to the subsoiling at depths of 0.60 m and 0.80 m improved the infiltration, storage and movement of water up to 0.50 m depth of Haplustent. However, both the trencher as subsoiler promoted soil compaction in layers located below the contact base of their stems.

KEYWORDS: Soil water, Structural change, Coffee implantation, Soil water movement, geostatistics.

1. INTRODUÇÃO

No intuito de mitigar os efeitos impactantes das mudanças climáticas na produção agrícola mundial de alimentos (SILLMANN et al., 2013), diferentes estudos têm sugerido a possibilidade de incorporação de áreas já antropizadas, e mesmo aquelas até então consideradas marginais ao sistema produtivo, através da adoção de técnicas de manejo que propiciem uma maior exploração do subsolo pelas raízes das culturas (KIRKEGAARD et al., 2007; SERAFIM et al., 2013a; SILVA et al., 2015). Isso se baseia na premissa de que as camadas mais profundas do solo têm potencial para armazenar apreciáveis conteúdos de água e nutrientes (KAUTZ et al., 2013; WIESMEIER et al., 2013; SCHNEIDER et al., 2017).

No Brasil, maior produtor e exportador de café do mundo (CECAFÉ, 2018), a produção se concentra nos Latossolos (Oxisols) e Argissolos (Ultisols), por apresentarem atributos favoráveis para o seu desenvolvimento. Entretanto, nos últimos anos têm sido incorporados solos menos profundos ao processo produtivo, a exemplo dos Cambissolos (Inceptisols), devido à disputa por espaço com outras culturas (principalmente grãos) (BERNARDES et al., 2012). É importante o acompanhamento do manejo destes solos tendo em vista o seu provável aumento de uso agrícola, salientando que os mesmos recobrem aproximadamente 1,5 bilhão de hectares em todo o mundo (IUSS WORKING GROUP WRB, 2015).

No estado de Minas Gerais, maior produtor de café do Brasil (CONAB, 2017), estes solos normalmente ocorrem em relevo movimentado, são adensados e apresentam pequena profundidade efetiva para o desenvolvimento do sistema radicular, o que, associado ao encrostamento superficial devido aos teores mais elevados de silte e/ou areia fina, os caracterizam como solos de baixa infiltração e permeabilidade. Isso potencializa o deflúvio superficial e conseqüentemente os processos erosivos (MELLEK et al., 2010; RESENDE et al., 2014, SOIL SURVEY STAFF, 1993). Tais atributos dificultam o desenvolvimento do cafeeiro nestes solos (EFFGEN et al., 2012). Entretanto, estudos recentes têm demonstrado que o sulco de plantio profundo (SCHNEIDER et al., 2017) associado a outras práticas de manejo possibilitam o uso racional dos mesmos, resultando em produtividades consideráveis (SERAFIM et al., 2011; 2013b).

Esses estudos têm demonstrado que os Cambissolos, embora dotados de uma matriz mais densa em relação aos Latossolos gibbsíticos, proporcionam uma maior disponibilidade hídrica em profundidade (SERAFIM et al., 2013a; 2013b; SILVA et al., 2015). Nessa linha de pesquisa, Serafim et al. (2013a) demonstraram que a variação sazonal da umidade, embora

significativa até a profundidade de 0,8 m, tende a se manter uniforme abaixo desta camada, o que justificaria investimentos para condicionar um maior desenvolvimento do sistema radicular para maior acesso das raízes à disponibilidade de água. Portanto, a hipótese do presente estudo é que o preparo do solo até a profundidade de 0,80 m pode diminuir a sazonalidade da água, favorecendo o desenvolvimento das raízes, tendo reflexo direto sobre a produtividade do cafeeiro.

Nesse contexto, como a disponibilidade de água para as culturas é diretamente afetada pelos atributos físicos do solo (KARAMI et al., 2012; KAHLON et al., 2013; SILVA et al., 2015; SILVA et al., 2017), o entendimento de como diferentes manejos modificam o processo de infiltração, redistribuição e retenção de água no solo se faz necessário. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar sistemas de preparo do solo para implantação de cafeicultura em área de Cambissolos adensados e rasos, por meio das alterações na configuração da porosidade e nas propriedades hidráulicas do solo, de forma a contribuir para a melhoria da eficiência de uso de água pelas plantas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. *Descrição da área de estudo*

A área experimental está situada no município de Nazareno (44° 39' 04" W, 21° 10' 52" S), estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1). O local tem clima tropical de altitude com a ocorrência de verões quentes e úmidos e invernos frescos e secos, que, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa com precipitação pluvial média de 1.200 a 1.500 mm ano⁻¹ e temperatura média anual variando entre 18 e 19 °C (PEEL et al. 2007). A vegetação dominante é de transição entre Florestas Estacionais Semidecíduas e os Cerrados (OLIVEIRA FILHO & FONTES, 2000).

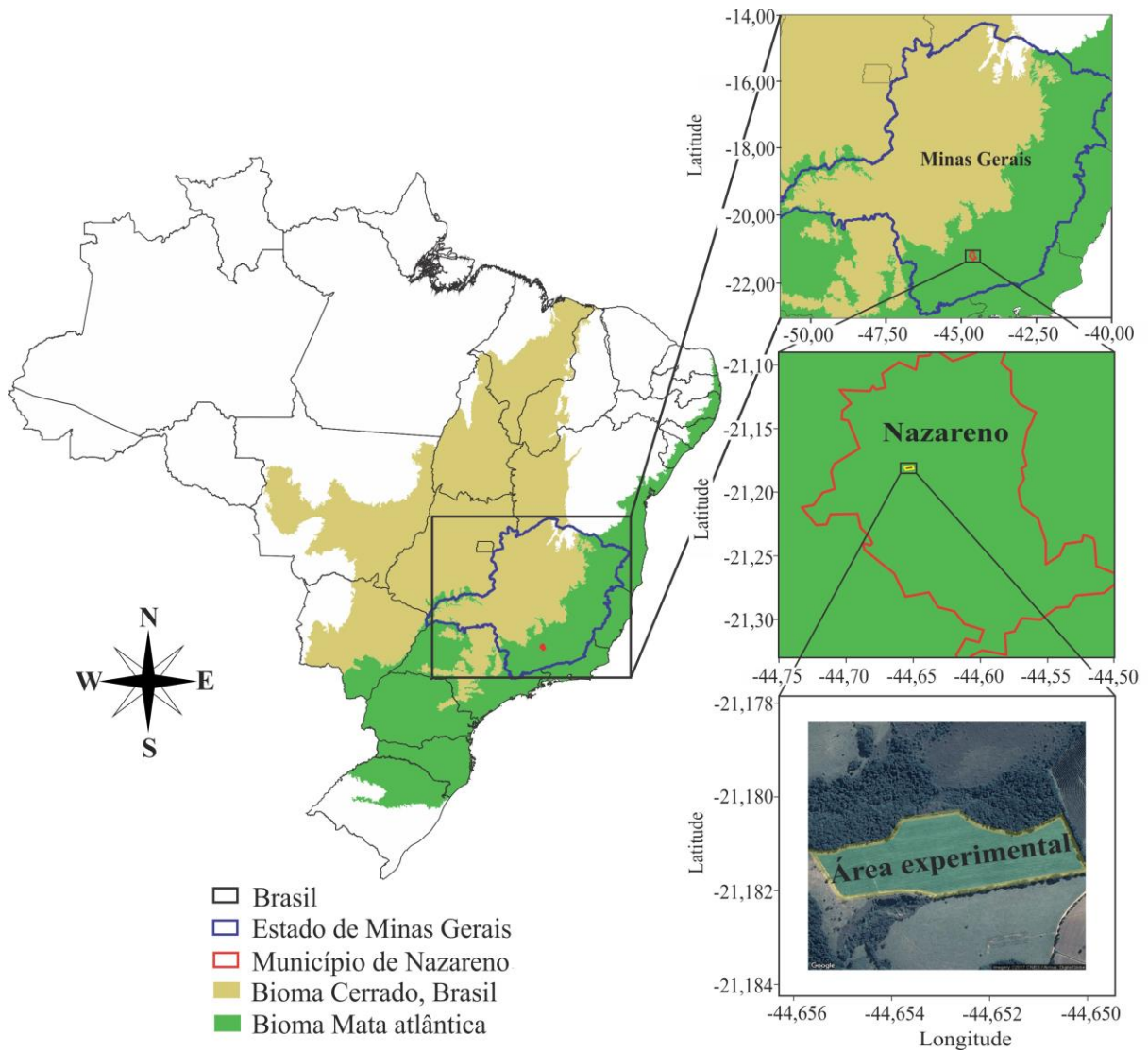


Figura 1. Localização da área de estudo, município de Nazareno no estado de Minas Gerais, Brasil.

2.2. Descrição dos tratamentos e preparo do sulco de plantio

2.2.1. Sistemas de manejo

O experimento foi instalado em área destinada ao cultivo de cafeeiros, cujo solo é classificado como Cambissolo Háplico Distrófico (EMBRAPA, 2013) ou Haplustent (SOIL SURVEY STAFF, 2014), implantado em novembro de 2015, na forma de delineamento em blocos ao acaso, com três repetições. As coletas de amostras indeformadas para análises foram realizadas conforme as profundidades e espaçamentos demonstrados na Figura 2A, sendo que estas ocorreram dezoito meses após a instalação, em maio de 2017. Foram avaliados cinco tratamentos, dispostos da seguinte forma: PS40, em que o sulco de plantio foi revolvido a 0,40 m de profundidade (Figura 2B); PS60, em que o sulco de plantio foi

revolvido a 0,60 m de profundidade (Figura 2C); PS80, onde a profundidade de revolvimento no sulco foi de 0,80 m (Figura 2D); EL, entrelinha com cobertura de braquiária (*Brachiaria decumbens*), e o Cerrado nativo (CN) que representa a condição de referência (Figura 2A). Esse último foi avaliado em local com características semelhantes às da unidade experimental, respeitando uma bordadura de 15 metros a partir da margem da reserva legal.

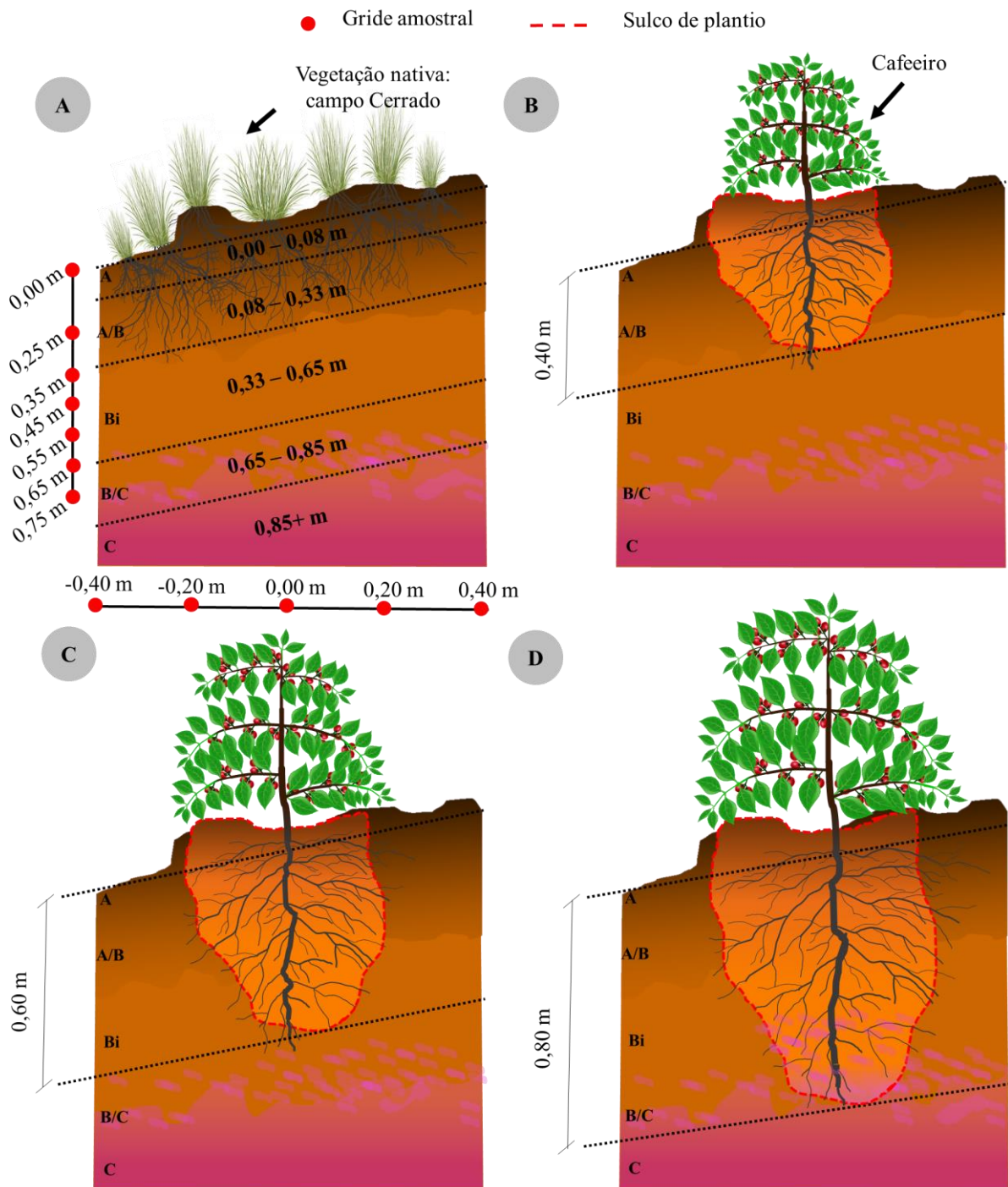


Figura 2. Representação esquemática dos perfis de Cambissolo sob Cerrado nativo (a), sistema SP40 = Sulco de plantio preparado a 0,40 m de profundidade (b), SP60 = Sulco de plantio revolvido a 0,60 m de profundidade (c) e SP80 = Sulco de plantio

revolvido a 0,80 m de profundidade (d) em lavoura cafeeira: A, A/B, Bi, B/C e C são horizontes do solo.

2.2.2. Preparo do sulco de plantio

As operações realizadas em cada tratamento estão dispostas na Tabela 1. A área útil de cada parcela foi de 9 m² (9x1 m), com 12 plantas. Em área total, foi realizado o revolvimento com auxílio de uma grade aradora (18 discos x 0,66 m) com 2,25 m de largura, acoplada a trator com potência nominal do motor de 150 cv.

Tabela 1. Descrição das operações realizadas em cada tratamento na área de estudo, município de Nazareno no estado de Minas Gerais, Brasil.

Operação realizada	Tratamento				
	SP40	SP60	SP80	EL	CN
Gradagem a 0,20 m de profundidade	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Plantio de braquiária	Não	Não	Não	Sim	Não
Subsolador a 0,40 m de profundidade no sulco de plantio	Sim	Não	Não	Não	Não
Subsolador a 0,60 m de profundidade no sulco de plantio	Não	Sim	Não	Não	Não
Subsolador dreno a 0,80 m de profundidade no sulco de plantio	Não	Não	Sim	Não	Não
Misturador de cova tipo enxada rotativa a 0,60 m de profundidade	Não	Sim	Sim	Não	Não

Manejo: PS40 = Sulco de plantio preparado a 0,40 m de profundidade, PS60 = Sulco de plantio revolvido a 0,60 m de profundidade, PS80 = Sulco de plantio revolvido a 0,80 m de profundidade, EL = entrelinha com plantio de braquiária, CN = Cerrado nativo.

Para a abertura dos sulcos de plantio, foi utilizado um sulcador para o preparo do solo até 0,40 m (PS40) e para as outras profundidades foi utilizado subsolador dotado de dreno para sulcagem nos tratamentos até 0,60 m (PS60) e 0,80 m (PS80).

A enxada rotativa (misturador ou batedor de cova) foi utilizada para misturar o solo até 0,60 m nos tratamentos PS60 e PS80. Esse equipamento possui seis flanges e lâmina tipo veloz regulada para 153 rpm, com 0,80 m de largura.

2.3. Análise textural

Para caracterização do solo, realizou-se análise textural pelo método da pipeta (EMBRAPA, 2017), utilizando as amostras de solo coletadas nas profundidades observadas na Figura 2A, além de uma fina camada superficial do solo (0-0,005 m) relacionada com crostas que eram bem visíveis. As frações granulométricas foram classificadas segundo SOIL SURVEY STAFF (2014) e apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Distribuição das partículas do solo por tamanho nos diferentes sistemas de manejo para cafeicultura e na área de referência sem cultivo agrícola.

Manejo	Profundidade	Frações texturais, %						
		AMG	AG	AM	AF	AMF	Silte	Argila
CN	0-0,005 m	2 a	2 a	9 b	16 b	5 a	24 a	42 a
EL		3 a	4 a	15 a	18 b	5 a	12 c	43 a
P40		4 a	3 a	15 a	16 b	4 a	16 b	42 a
P60		2 a	4 a	14 a	21 a	5 a	12 c	42 a
P80		3 a	4 a	14 a	20 a	5 a	13 c	41 a
CN	0-0,05 m	2 a	3 a	8 a	14 b	4 a	21 a	48 a
EL		4 a	5 a	13 a	15 b	5 a	10 c	48 a
PS40		3 a	4 a	7 a	15 b	4 a	18 a	49 a
PS60		3 a	5 a	11 a	18 a	4 a	13 b	46 a
PS80		2 a	5 a	10 a	17 a	3 a	15 b	48 a
CN	0,25-0,30 m	2 a	5 a	9 b	13 a	4 a	16 a	51 a
EL		3 a	4 a	7 b	13 a	6 a	18 a	49 a
PS40		3 a	5 a	7 b	14 a	5 a	18 a	48 a
PS60		2 a	4 a	13 a	13 a	4 a	17 a	47 a
PS80		4 a	4 a	11 a	15 a	4 a	18 a	44 a
CN	0,35-0,40 m	3 a	5 a	11 a	14 a	4 a	13 a	50 a
EL		4 a	3 a	10 a	14 a	5 a	15 a	49 a
PS40		4 a	2 a	10 a	16 a	5 a	14 a	49 a
PS60		2 a	3 a	13 a	16 a	4 a	13 a	49 a
PS80		3 a	3 a	12 a	15 a	4 a	15 a	48 a
CN	0,45-0,50 m	2 a	3 a	13 a	17 a	4 b	13 a	48 a
EL		2 a	4 a	10 b	16 a	5 a	16 a	47 a
PS40		3 a	4 a	11 b	15 b	5 a	16 a	46 a
PS60		4 a	5 a	10 b	13 b	4 b	15 a	49 a
PS80		3 a	6 a	10 b	15 b	4 b	15 a	47 a
CN	0,55-0,60 m	3 a	2 a	13 a	16 a	5 a	14 a	47 a
EL		3 a	3 a	12 a	17 a	5 a	13 a	47 a
PS40		2 a	3 a	14 a	17 a	5 a	13 a	46 a
PS60		4 a	4 a	11 a	16 a	4 a	14 a	47 a
PS80		2 a	4 a	13 a	16 a	4 a	13 a	48 a
CN	0,65-0,70 m	4 a	4 b	10 b	15 a	4 a	16 a	47 a
EL		3 a	4 b	9 b	16 a	5 a	15 a	48 a
PS40		4 a	3 b	14 a	17 a	5 a	14 a	43 a
PS60		3 a	5 a	9 b	13 b	4 a	17 a	49 a
PS80		3 a	6 a	9 b	14 b	5 a	17 a	46 a
CN	0,75-0,80 m	4 a	4 a	6 a	15 a	4 a	22 a	45 a
EL		3 a	4 a	6 a	15 a	5 a	21 a	46 a
PS40		3 a	4 a	8 a	16 a	4 a	20 a	45 a
PS60		3 a	4 a	7 a	14 a	5 a	21 a	46 a
PS80		3 a	3 a	7 a	14 a	5 a	22 a	46 a

Manejo: PS40 = Sulco de plantio preparado a 0,40 m de profundidade, PS60 = Sulco de plantio revolvido a 0,60 m de profundidade, PS80 = Sulco de plantio revolvido a 0,80 m de profundidade, EL = entrelinha com plantio de braquiária, CN = Cerrado nativo. Frações granulométricas: AMG = areia muito grossa, AG = areia grossa, AM = areia média, AF = areia fina, AMF = areia muito fina, silte, argila. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não apresentam diferença significativa pelo teste de Skott Knott ($p \leq 0,05$).

2.4. *Infiltração de água no solo*

A avaliação da infiltrabilidade básica ou velocidade de infiltração básica (VIB) foi realizada com auxílio de um infiltrômetro de tensão, com diâmetro da base de 0,25 m (PERROUX & WHITE, 1988). Foram realizadas medições de infiltração de água sob potenciais de -0,30, -0,20, -0,05 e 0 m de coluna de água, permitindo o estudo do movimento da água em condição de solo não saturado (potenciais negativos) e tensão igual a zero, em que a água flui por todos os poros do solo. Nessa análise após o infiltrômetro ser devidamente alocado sobre o solo (PERROUX & WHITE, 1988) e ajustado para uma tensão constante h , foram realizadas medições até se atingir um fluxo constante por unidade de tempo. Para a determinação dos valores de VIB, utilizou-se a seguinte equação:

$$VIB = q * 60 * \left(\frac{Dt^2}{Db^2} \right) \quad (\text{Eq: 1})$$

em que: VIB, é a velocidade de infiltração básica (mm h^{-1}); q , é o fluxo constante de água do infiltrômetro de tensão (mm min^{-1}); Dt , é o diâmetro do tubo do infiltrômetro de tensão (mm); Db , é o diâmetro da base do infiltrômetro de tensão (mm).

2.5. *Condutividade hidráulica do solo saturado (K_o)*

Para o estudo da condutividade hidráulica do solo saturado (K_o) foram utilizadas amostras com estrutura preservada em anéis volumétricos, de 0,08 m de altura e 0,063 m de diâmetro, coletadas com auxílio do amostrador tipo Uhland. Coletou-se um total de 35 amostras em um perfil longitudinal a linha de plantio (gride amostral de 7 x 5) (Figura 2A), em cada um dos sistemas de manejo e condição de referência.

No laboratório as amostras foram saturadas por capilaridade por um período de 24 h. Em seguida as amostras foram submetidas ao teste de permeabilidade, utilizando-se um permeâmetro de carga constante, conforme a metodologia descrita em Klute (1965). Para evitar o fluxo preferencial de água junto à parede do cilindro, usou-se um suporte coletor de água percolada (LIMA et al., 1990). A condutividade hidráulica saturada foi estimada segundo modelo proposto por Darcy-Willians (Eq: 2) (KLUTE, 1965).

$$K_o = \frac{V_A L}{A t (H_{c.água} + L)} \quad (\text{Eq: 2})$$

Em que: K_o é a condutividade hidráulica saturada do solo (mm h^{-1}); V_A é o volume de água coletado no intervalo de tempo (mm^3); A é a área da secção transversal (mm^2); L é o comprimento do filtro que contém a amostra (mm); $H_{c.\text{água}}$ é a altura da coluna de água (mm); t é o tempo de coleta (horas).

2.6. Curva de retenção de água no solo

Para a determinação das curvas de retenção de água, as amostras foram coletadas com estrutura preservada em anéis volumétricos (cilindros de alumínio de 6,4 cm de diâmetro x 2,5 cm de altura), utilizando um amostrador do tipo Uhland. Para tanto foi aberta uma trincheira para cada situação do estudo (5 sistemas de manejo x 7 profundidades x 3 repetições) (Figura 2A), totalizando 105 amostras.

Em laboratório, após saturadas por capilaridade a partir da base com água destilada, as amostras foram submetidas sequencialmente a oito potenciais matriciais: -0,01 (considerada como saturação); -2, -4, -6 e -10 kPa, em funis de placas porosas em uma Unidade de Sucção; e -33, -100, -500 e -1.500 kPa, nos aparelhos extratores de Richards (EMBRAPA, 2017). Após atingir o equilíbrio hídrico, as amostras foram pesadas e em seguida secas em estufa a ± 105 °C, por 24 h, para cálculo do conteúdo volumétrico de água do solo (θ) nos potenciais.

A relação funcional entre o conteúdo volumétrico de água e os respectivos potenciais foi obtida através da minimização da soma dos quadrados dos desvios para ajuste ao modelo proposto por van Genuchten (1980) (Eq: 3):

$$\theta = \theta_R + \frac{\theta_S - \theta_R}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m} \quad (\text{Eq: 3})$$

em que: θ é o conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_S é o conteúdo de água na condição de solo saturado ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_R é o conteúdo de água do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) no potencial de -1.500 kPa; h é a sucção da água no solo (kPa); α , n e $m = (1-1/n)$, são parâmetros empíricos da equação.

2.7. Curva de distribuição de poros por tamanho

A curva de distribuição do volume de poros "normalizada", $S^*(h)$, para cada condição de estudo, foi calculada a partir da primeira derivada da Equação 4, na forma $\theta = f(\ln h)$, e expressa confeccionando o gráfico do diâmetro de poro equivalente (d) em uma escala \log_{10} (Equação 4) (REYNOLDS et al., 2009).

$$S(h) = \frac{m(\alpha h)^n \left[1 + m^{-1}\right]^{(m+1)}}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^{(m+1)}}; \quad 0 \leq S^*(h) \leq 1 \quad (\text{Eq: 4})$$

em que: $S(h)$ é a densidade do volume de poros normalizados; h , é a sucção da água no solo (kPa).

As classes de poros geradas foram denominadas de acordo com os critérios micromorfológicos (BULLOCK et al., 1985; CARDUCCI et al., 2015), sendo as classes divididas em: macroporos ($>73 \mu\text{m}$); mesoporos grandes ($73-49$ e $49-29 \mu\text{m}$); mesoporos médios ($29-9$ e $9-2,9 \mu\text{m}$); mesoporos finos ($2,9-0,2 \mu\text{m}$); e microporos ($< 0,2 \mu\text{m}$).

2.8. Condutividade hidráulica do solo não-saturado

A condutividade hidráulica não saturada (K) (Eq: 6) foi calculada segundo o modelo proposto por van Genuchten (1980) a partir do produto da K_o (Eq: 2) com a condutividade hidráulica relativa (K_r) (Eq: 5):

$$K_r(h) = \frac{\left\{1 - (\alpha h)^{n-1} \left[1 + (\alpha h)^n\right]^{-m}\right\}^2}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^{\frac{m}{2}}} \quad (\text{Eq: 5})$$

$$K = K_r(h) K_o \quad (\text{Eq: 6})$$

2.9. Tratamento de dados e análises estatísticas

2.9.1. Geoestatística

A vetorização do perfil do Cambissolo foi obtida a partir da demarcação, por meio de uma fita métrica. Após ser aberta uma trincheira (dimensões $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$), foi realizada a demarcação da malha amostral conforme apresentado na Figura 2A.

Os métodos geoestatísticos utilizados foram: análise exploratória espacial dos dados; gráfico Boxplot para identificar pontos discrepantes; gráfico Postplot utilizado para identificar tendência direcional dos dados. A isotropia foi avaliada mediante a construção de semivariogramas nas direções 0 , 45 , 90 e 135° (GUEDES et al., 2008).

A análise da variabilidade espacial para K_o foi realizada a partir da função semivariância, estimada utilizando o estimador de Matheron (CRESSIE, 1993), para uma variável georreferenciada $Z(S_i)$ com distribuição gaussiana, apresentado na Equação 7:

$$\hat{\gamma}(d) = \frac{1}{2N(d)} \sum_{i=1}^{N(d)} \left[Z(S_i) - Z(S_i + d) \right]^2 \quad (\text{Eq: 7})$$

em que: $Z(si)$ e $Z(si+d)$ são valores da variável regionalizada em estudo nas posições si e $si+d$, sendo si uma coordenada espacial $(xi, yi) \in S$, em que S é um espaço paramétrico de R^2 ; $N(d)$ corresponde ao número de pares de valores amostrados separados por uma distância d .

O modelo ajustado para o semivariograma experimental (Equação 8) foi o esférico (JOURNEL e HUIJBREGTS, 1991; CRESSIE, 1993; DIGGLE e RIBEIRO JUNIOR, 2007; COELHO et al., 2009).

$$\gamma(d) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{d}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{d}{a} \right)^3 \right]; 0 < d < a \quad (\text{Eq: 8})$$

em que: C_0 é o efeito pepita; C_1 é a contribuição; d é a distância entre pares de pontos; a é o alcance; e d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido. Para avaliar eficiência do melhor modelo de ajuste foi considerada a dependência espacial (DE, em %) conforme modelo proposto por Biondi et al. (1994) (Equação 8):

$$DE = \left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right) 100 \quad (\text{Eq: 9})$$

sendo que uma maior DE é indicativo de um modelo com maior estrutura de continuidade espacial.

Os parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados foram utilizados para estimar valores de K_0 em locais não amostrados, por meio da krigagem ordinária. Após confeccionados, os mapas de K_0 foram divididos em zonas de permeabilidade segundo uma adaptação do Soil Survey Staff (1993), conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Classes de permeabilidade do solo à água, usadas no zoneamento dos mapas.

Classe	Rápida	Moderada a rápida	Moderada	Lenta a moderada	Lenta	Muito lenta
K_0 (mm h ⁻¹)	>254	254-127	127-63,5	63,5-20	20-5	< 5

Fonte: Soil Survey Staff (1993).

2.9.2. Comparação de médias e ajustes de modelos

Os dados de infiltração de água no solo foram submetidos à análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Skott Knott ($p \leq 0,05$) (BORGES e FERREIRA, 2002).

Os parâmetros dos modelos de curva de retenção de água, que foram empregados na curva de distribuição do volume de poros e condutividade hidráulica não saturada, foram estimados pelo método dos mínimos quadrados para modelos não lineares nos parâmetros (RITZ e STREIBIG, 2008).

2.9.3. Recursos computacionais

Os testes estatísticos, bem como, os gráficos e mapas temáticos foram confeccionados, com auxílio do software R 3.4.1 (R CORE TEAM, 2017) e seus módulos: geoR (RIBEIRO JUNIOR e DIGGLE, 2001) e ggplot2 (WICKHAM, 2009).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Velocidade de infiltração básica (VIB)

Os valores de velocidade de infiltração básica (VIB) nos diferentes sistemas de manejos e na área de Cerrado nativo (CN) estão discriminados na Figura 3. Os tratamentos influenciaram significativamente a VIB, sendo que os resultados indicam que os poros estruturais, que são poros de maior diâmetro inferidos pela infiltração em menores potenciais, resultantes da ação dos equipamentos de preparo do sulco ou da ação do sistema radicular da braquiária, influenciaram a VIB até a tensão de -0,20 m de coluna de água. A partir dessa tensão há um predomínio das características texturais do solo.

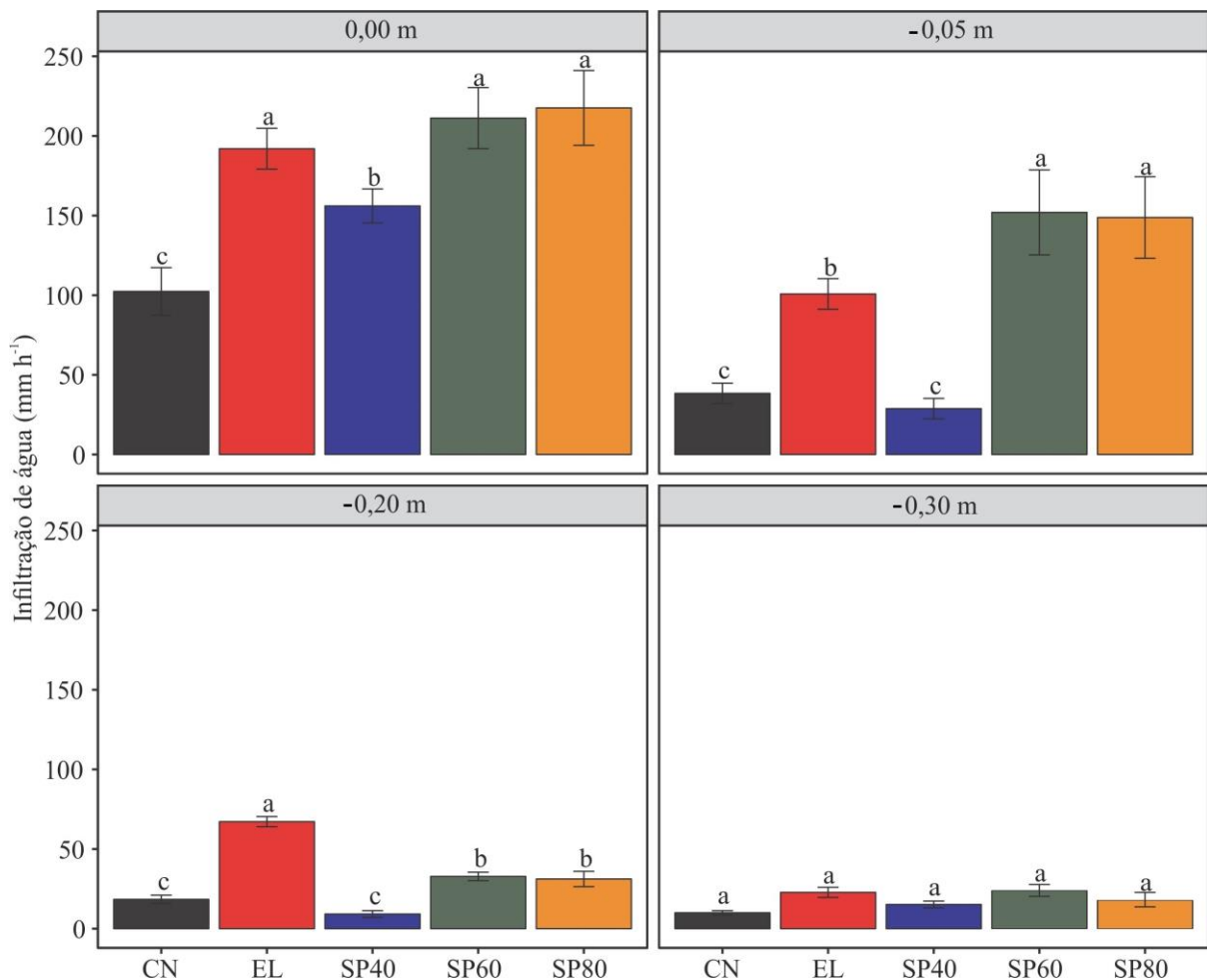


Figura 3. Velocidade de infiltração básica (VIB) obtidos nas tensões de 0, -0,05, -0,20 e -0,30 m em cinco sistemas de manejo: PS40 = Sulco de plantio preparado a 0,40 m de profundidade, PS60 = Sulco de plantio revolvido a 0,60 m de profundidade, PS80 =

Sulco de plantio revolvido a 0,80 m de profundidade, EL = entrelinha com plantio de braquiária, CN = Cerrado nativo. Médias seguidas pela mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste de Skott Knott ($p \leq 0,05$).

Ao avaliar a VIB na tensão igual a 0, em que a água flui por todos os poros do solo, nota-se aumento na ordem de 146%, 206%, 213% e 188% respectivamente para os tratamentos PS40, PS60, PS80 e EL em relação ao CN. Na tensão de -0,05 m de coluna de água houve um incremento da VIB de 396% e 388%, em relação ao CN, respectivamente, para PS60 e PS80. Para a tensão de -0,20 m de coluna de água o tratamento EL foi superior aos demais chegando a 175% de aumento em relação à condição natural, demonstrando a importância de se manter a entrelinha da cultura cafeeira com planta de cobertura.

Nesse sentido, é importante destacar que o sistema radicular da braquiária é capaz de promover uma estruturação adequada do solo (LAL e VANDOREN, 1990; ROCHA et al., 2016), possibilitando melhor movimentação da água pelos bioporos (canais abertos e deixados pelas raízes). Além disso, os resíduos dessa cultura também contribuem com o aporte de matéria orgânica que atua como elemento estabilizador dos agregados, promovendo a formação de agregados maiores e mais estáveis (OADES, 1984; SILVA e MIELNICZUK, 1998; PINHEIRO et al., 2004; BRONICK e LAL, 2005; BELDINI et al., 2010). Estes, por sua vez, favorecem o aumento da resistência do solo à erosão, sobretudo considerando a baixa resistência dos Cambissolos em condições naturais (SANTOS et al., 1998).

A baixa infiltração de água no solo sob CN deve estar relacionada ao maior conteúdo de silte presente na camada de 0,005 m (Tabela 2), provavelmente associado ao selamento ou encrostamento superficial (VALENTIN e BRESSON, 1992; CHAVES et al., 1993), visível naquela área. As queimadas, comuns em áreas de Cerrado nativo, são outro fator importante na formação do selamento superficial, tendo em vista que o aquecimento da camada superficial do solo ocasiona a volatilização e condensação de substâncias orgânicas, formando uma camada superficial hidrofóbica (FOX et al., 2007; MADSEN et al., 2011).

A VIB maior nos tratamentos PS60 e PS80 em relação ao PS40 pode ter relação com o uso da enxada rotativa (batedor de cova) utilizada somente nos dois primeiros tratamentos (Tabela 1). A enxada rotativa promove revolvimento das camadas do solo (SCHNEIDER et al., 2017) aumentando a porosidade e possivelmente a conectividade de seus poros, o que favoreceria o movimento da água (PERROUX e WHITE, 1988; EVERTS e KANWAR, 1992). É de se destacar a contribuição ambiental deste processo, pois com o aumento da infiltração de água há provável redução do escoamento superficial e, conseqüentemente, do

processo erosivo, além de possível aumento na recarga do lençol freático (SCHNEIDER et al., 2017).

3.2. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada

Na Tabela 3, são apresentados os resultados da estatística descritiva dos sistemas de manejo para a variável regionalizada condutividade hidráulica do solo saturado (K_o). Os resultados obtidos para a K_o evidenciam a heterogeneidade dos dados no solo nos vários tratamentos, haja vista os elevados coeficientes de variação de 66,01% a 140,78% (Tabela 3), o que, entretanto, é comum para este parâmetro (JURY et al., 1991; SCHERPINSKI et al., 2010). A condutividade hidráulica do solo saturado depende do espaço poroso total do solo, que por sua vez varia bastante em função de práticas de manejo adotadas que alteram a sua estrutura.

Tabela 3. Análise exploratória e parâmetros do semivariograma para condutividade hidráulica saturada (K_o) em Cambissolo nos diferentes manejos adotados.

	CN	EL	PS40	PS60	PS80
Estatística descritiva					
Nº de amostras ⁽¹⁾	35	35	35	35	35
Média	30,71	40,99	29,73	61,61	102,02
Mínimo	8,53	10,09	3,61	1,29	1,01
1º Quartil	16,74	12,48	4,53	4,07	4,87
Mediana	19,15	15,03	12,41	18,93	77,33
3º Quartil	43,87	68,24	24,67	110,85	179,75
Máximo	76,68	135,40	140,36	236,81	302,57
Variância	411,09	1815,57	1752,27	5057,94	10173,70
DP ⁽²⁾	20,27	42,61	41,86	71,12	100,83
CV ⁽³⁾	66,01	103,96	140,78	115,43	98,87

⁽¹⁾ Média de três repetições; ⁽²⁾ Desvio padrão; ⁽³⁾ Coeficiente de variação em %. Sistemas de manejo: PS40 = Sulco de plantio preparado a 0,40 m de profundidade, PS60 = Sulco de plantio revolvido a 0,60 m de profundidade, PS80 = Sulco de plantio revolvido a 0,80 m de profundidade, EL = entrelinha com plantio de braquiária, CN = Cerrado nativo.

O gráfico da semivariância experimental dos resíduos da K_o (mm h^{-1}) é apresentado na Figura 4. Observa-se, nesta figura, uma estrutura de dependência espacial com ajuste de um modelo esférico. O uso dos semivariogramas para a análise geoestatística permitiu verificar a presença de dependência espacial (BIONDI et al., 1994) da K_o ao longo dos perfis de Cambissolos. A dependência espacial elevada nos tratamentos PS40, PS60, PS80 e CN (Figura 4) demonstra a continuidade das amostras desses sistemas de manejo ao longo do

perfil do Cambissolo, enquanto que a baixa dependência espacial observada EL é resultado do elevado efeito pepita oriundo da variabilidade não detectada pelo sistema de amostragem.

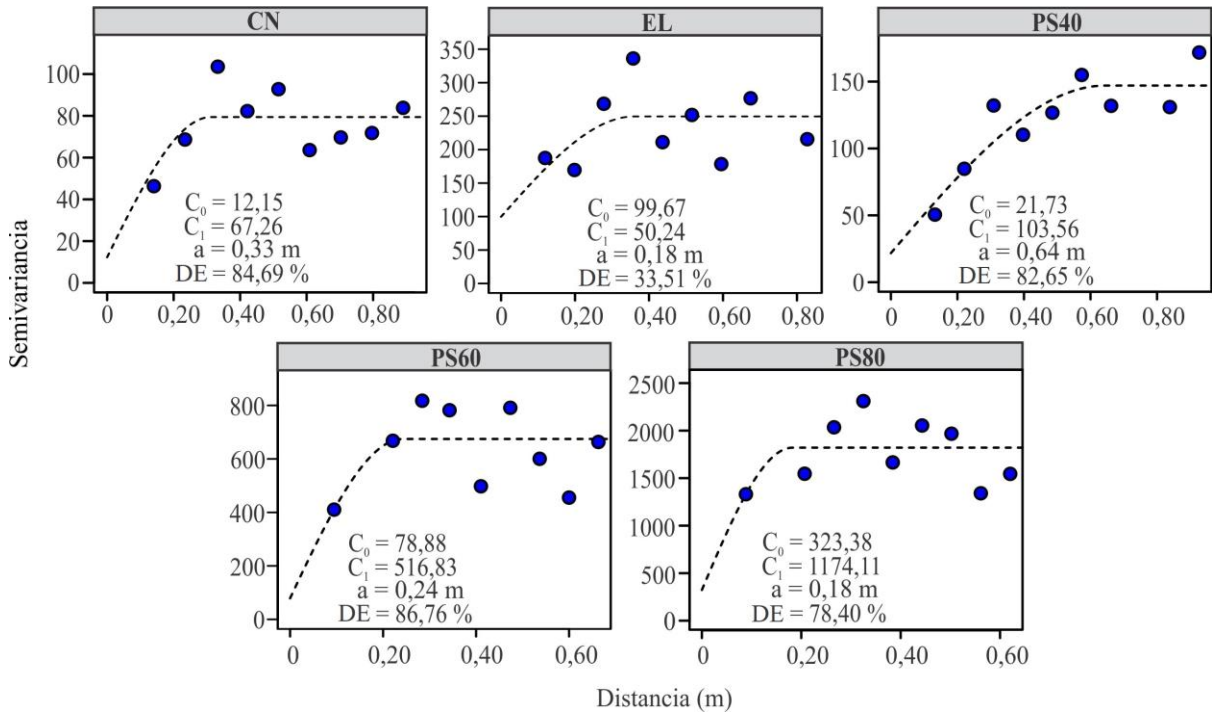


Figura 4. Semivariogramas experimentais e teóricos dos dados de condutividade hidráulica saturada para os sistemas de manejo: PS40 = Sulco de plantio preparado a 0,40 m de profundidade, PS60 = Sulco de plantio revolvido a 0,60 m de profundidade, PS80 = Sulco de plantio revolvido a 0,80 m de profundidade, EL = entrelinha com plantio de braquiária, CN = Cerrado nativo. Parâmetros do semivariograma: C_0 = efeito pepita, C_1 = contribuição, d = distância entre pares de pontos, a = alcance. DE = dependência espacial.

De acordo com os mapas de krigagem (Figura 5), pode-se observar uma maior K_0 no solo (rápida e rápida a moderada) entre os sistemas SP60 (até 0,25 m de profundidade) e SP80 (até 0,43 m de profundidade) em comparação às demais situações de estudo (P40, EL e CN). Esses resultados estão associados ao uso do subsolador, mas, principalmente, à enxada rotativa que promove afrouxamento e revolvimento do solo, favorecendo a formação de poros maiores (macroporos) (Figura 6) que facilitam o fluxo de água. A relação entre o aumento da macroporosidade (poros drenáveis) e da K_0 , em razão do preparo do solo é relatada em vários estudos (TOLLNER et al., 1984; HILL e CRUSE, 1985; CORRÊA, 1985; PELEGRINI et al., 1990; BARBOSA, et al., 2004; RIBEIRO, et al. 2007; MENTGES et al., 2010).

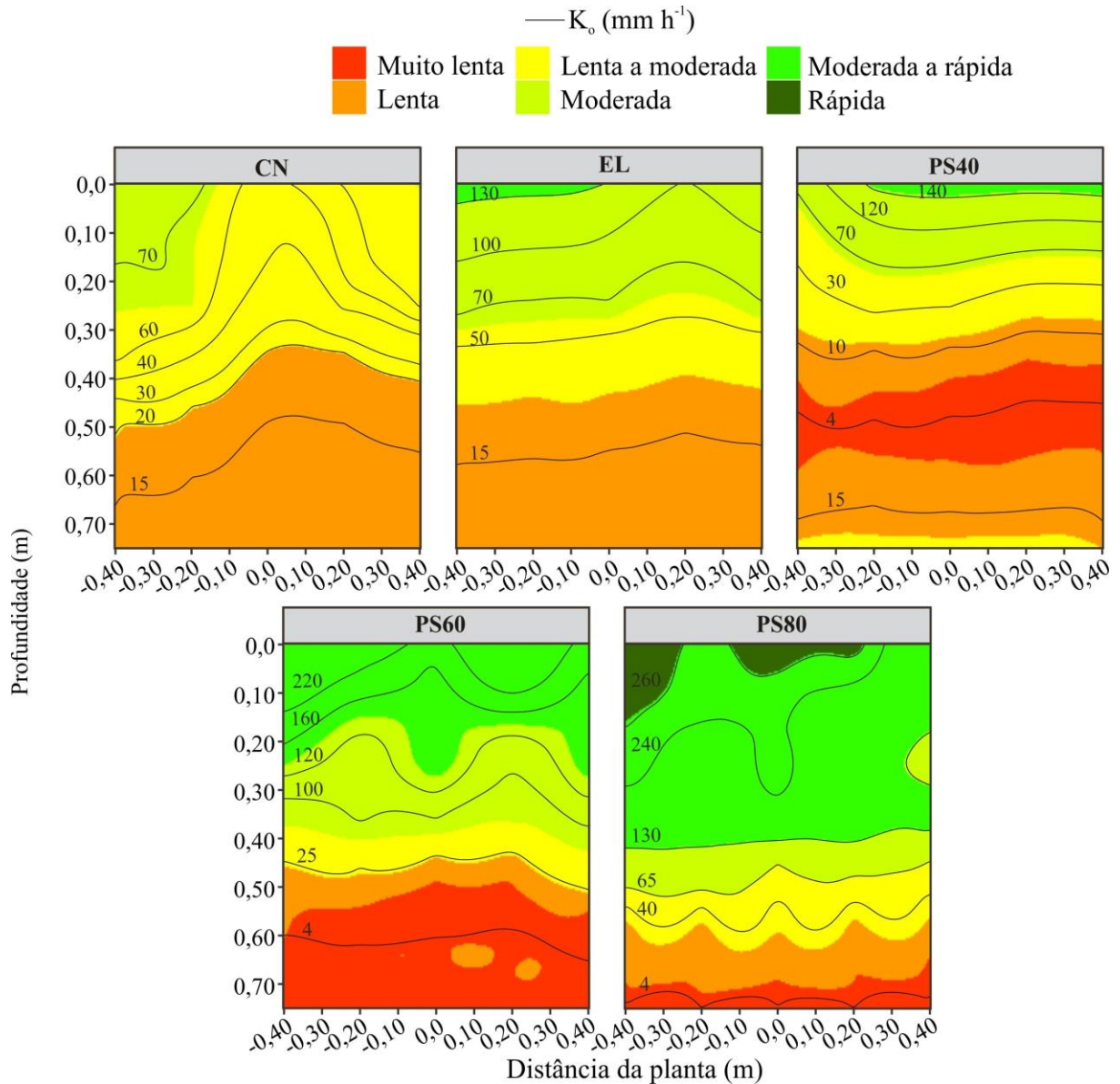


Figura 5. Mapa da permeabilidade (K_o , mm h⁻¹) do solo, ao longo do perfil, para os sistemas de manejo: PS40 = Sulco de plantio preparado a 0,40 m de profundidade, PS60 = Sulco de plantio revolvido a 0,60 m de profundidade, PS80 = Sulco de plantio revolvido a 0,80 m de profundidade, EL = entrelinha com plantio de braquiária, CN = Cerrado nativo.

No entanto, pequenos poros podem conduzir mais água quando são poros contínuos, enquanto poros maiores em uma dada seção podem não contribuir para o fluxo quando apresentam descontinuidade no solo (BOUMA, 1982). Deste modo, o tamanho é menos importante que o padrão de continuidade dos poros no solo.

Percebe-se ainda que a K_o nos sistemas PS40, PS60 e PS80 é muito lenta em camadas localizadas nas profundidades de 0,40-0,55 m, 0,52-0,75 m e 0,70-0,80 m, respectivamente.

Considerando que no solo sob CN e no tratamento EL a K_o foi superior naquelas profundidades comparado aos demais tratamentos, é razoável pensar que, nas áreas trabalhadas com sulcador e subsolador, a diminuição drástica na permeabilidade do solo em profundidades abaixo do fundo do sulco se deve à ação da base dos equipamentos, que ao exercer forte pressão promoveram a compactação do solo. Por outro lado, esta redução da permeabilidade pode acabar contribuindo para a permanência de água por mais tempo nessas camadas, o que pode ser favorável ao desenvolvimento do cafeeiro, particularmente no primeiro ano de condução.

As diferenças encontradas entre os sistemas de preparo do sulco de plantio devem servir de subsídio na seleção de equipamentos, pois pode indicar respostas de favorecimento ou não ao desenvolvimento do sistema radicular da cultura na sua fase inicial, o que tende a influenciar na longevidade de cultivos perenes, exemplo do cafeeiro, alterando inclusive o manejo de podas. O condicionamento do solo obtido pelos sistemas de preparo, com destaque para PS80, em função do aumento na capacidade de transmissão de água até 0,65 m, pode também contribuir para amenização do estresse hídrico das plantas, com possível impacto na produtividade (SILVA et al., 2015).

3.3. Modelo de van Genuchten e comportamento hidrodinâmico do solo

Os parâmetros do modelo de van Genuchten (θ_s , θ_R , α , n) apresentaram, de forma geral, diferenças entre os tratamentos (CN, EL, PS40, PS60, PS80) e os coeficientes de determinação (entre 0,988 e 0,999) indicam bom ajuste dos dados em todas as situações de estudo (Tabela 4), resultado que também pode ser confirmado na menor dispersão dos pontos em torno dos valores ajustados na curva de retenção de água (Figura 6).

Tabela 4. Parâmetros do modelo de van Genuchten para diferentes manejos aplicados ao Cambissolo. Umidade de saturação (θ_s , $m^3 m^{-3}$), umidade residual (θ_R , $m^3 m^{-3}$), parâmetros de ajuste (α e n) e coeficiente de determinação (R^2).

Manejo	PS40	PS60	PS80	EL	CN
0,00-0,05 m					
θ_R	0,247	0,262	0,270	0,209	0,212
θ_s	0,640	0,653	0,660	0,620	0,577
α	0,636	0,592	0,504	0,678	0,921
n	1,497	1,412	1,457	1,546	1,556
R^2	0,991	0,990	0,993	0,996	0,993
0,25-0,30 m					
θ_R	0,240	0,269	0,285	0,243	0,241

θ_S	0,555	0,616	0,633	0,577	0,568
α	0,776	0,507	0,540	0,356	0,325
n	1,577	1,547	1,523	1,804	1,849
R^2	0,997	0,992	0,994	0,996	0,991
----- 0,35-0,40 m -----					
θ_R	0,229	0,243	0,247	0,237	0,243
θ_S	0,517	0,609	0,616	0,561	0,573
a	0,940	0,444	0,633	0,901	0,740
α	1,638	1,586	1,470	1,580	1,633
R^2	0,998	0,992	0,994	0,999	0,998
----- 0,45-0,50 m -----					
θ_r	0,258	0,254	0,282	0,257	0,266
θ_S	0,495	0,598	0,612	0,573	0,580
a	0,513	0,401	0,427	0,569	0,623
α	1,645	1,518	1,466	1,461	1,470
R^2	0,999	0,995	0,992	0,996	0,994
----- 0,55-0,60 m -----					
θ_R	0,268	0,267	0,279	0,290	0,288
θ_S	0,553	0,501	0,571	0,559	0,560
a	0,982	0,820	0,740	0,725	0,753
α	1,378	1,572	1,428	1,455	1,445
R^2	0,993	0,997	0,994	0,993	0,992
----- 0,65-0,70 -----					
θ_R	0,262	0,263	0,288	0,273	0,276
θ_S	0,537	0,488	0,549	0,553	0,545
a	0,299	0,508	0,329	0,364	0,338
α	1,480	1,534	1,441	1,497	1,471
R^2	0,996	0,997	0,988	0,994	0,993
----- 0,75-0,80 -----					
θ_R	0,271	0,247	0,254	0,258	0,276
θ_S	0,541	0,485	0,491	0,553	0,544
a	0,313	0,419	0,384	0,370	0,293
α	1,787	1,842	1,934	1,696	1,716
R^2	0,993	0,998	0,993	0,995	0,996

Sistemas de manejo: PS40 = Sulco de plantio preparado a 0,40 m de profundidade, PS60 = Sulco de plantio revolvido a 0,60 m de profundidade, PS80 = Sulco de plantio revolvido a 0,80 m de profundidade, EL = entrelinha com plantio de braquiária, CN = Cerrado nativo.

O parâmetro “ α ” apresentou valores discrepantes em relação aos sistemas de manejo e profundidades avaliadas (Tabela 4). Cabe ressaltar que menores valores de “ α ” indicam maior

amplitude da região de entrada de ar descrita na curva característica (RADCLIFFE e ŠIMUNEK, 2010). Este parâmetro está relacionado ao potencial de entrada de ar (decréscimo de θ), o que contribui para o entendimento do processo de secagem do solo e manejo a ser adotado.

Para o parâmetro “n”, observou-se que os sistemas de manejo PS40, PS60 e PS80 apresentaram menores valores em comparação a EL e CN, próximo à superfície. No entanto, à medida que aumentou a profundidade do solo esses valores se tornaram mais elevados. Isso pode ter acontecido em função do aumento dos macros e mesoporos próximos à superfície do Cambissolo (Figura 6) e pela redução destes poros abaixo da zona de atuação dos implementos, o que encontra respaldo nos menores valores de θ_s naqueles tratamentos, salientando que este parâmetro é a quantificação aproximada do volume total de poros do solo. Assim, à medida que o ajuste da curva resulta em maiores valores de “n”, maior será a inclinação da mesma (RADCLIFFE e ŠIMUNEK, 2010).

A Figura 6 indica alguns aspectos positivos e negativos no comportamento físico-hídrico do Cambissolo em função do manejo empregado. Houve maior retenção de água, macroporos, mesoporos grandes, mesoporos médios e condutividade de água não saturada no solo para os sistemas SP60 e SP80, até a profundidade de 0,45-0,50 m, em comparação às demais situações de estudo (P40, EL e CN). A semelhança entre estes tratamentos ocorreu pela alteração na configuração dos poros do solo causada pelo uso da enxada rotativa em ambos. Esse equipamento aumentou principalmente os poros grandes, na maior parte do tempo funcionando como espaços vazios no solo, fazendo com que haja um aumento dos fluxos de água e ar, o que favorece o desenvolvimento do sistema radicular do cafeeiro (CARDUCCI et al., 2015; SILVA et al., 2015).

O aumento da macroporosidade nos tratamentos SP60 e SP80 contribuem na capacidade de aeração do Cambissolo (THOMASSON, 1978), visto que estes poros estão diretamente relacionados com a difusão de oxigênio no solo para as raízes (GRABLE e SIEMER, 1968). Além disso, os macroporos aumentam a condutividade hidráulica do solo, como observado na figura 5, proporcionando uma rápida drenagem, o que diminui os riscos de erosão (MENTGES et al., 2010).

A ampliação no volume de mesoporos grandes e médios para os sistemas SP60 e SP80, até a profundidade 0,50 m do solo (Figura 6), implica maior disponibilidade de água, favorecendo o desenvolvimento da cultura (BRAUNACK e DEXTER, 1989; CARDUCCI et al., 2014; SILVA et al., 2015). Nesse sentido, Carducci et al. (2014), verificaram que os mesoporos grandes ($\emptyset > 0,2$ mm) favoreceram o desenvolvimento das raízes finas ($\emptyset \leq 1$

mm), o que proporciona um melhor aproveitamento da água de irrigação ou chuva, pois são nesses poros que a água se encontra prontamente disponível para as culturas. Nesses tratamentos, embora o revolvimento tenha aumentado os mesoporos até 0,50 m de profundidade, abaixo da zona de ação dos implementos houve uma redução dos mesoporos e aumento de microporos. Esses resultados corroboram com a literatura, onde há relatos que o revolvimento do solo rompe a conectividade e a estrutura dos mesoporos, aumentando o número de poros com tamanhos menores (MALONE et al., 2003; OORTS et al., 2007), enquanto outros relatam um aumento de mesoporos maiores em função do revolvimento (BESCANSA et al., 2006). Todavia no caso do tratamento PS80, a aparente compactação pode ter relação com a profundidade do horizonte C do Cambissolo (Figura 2).

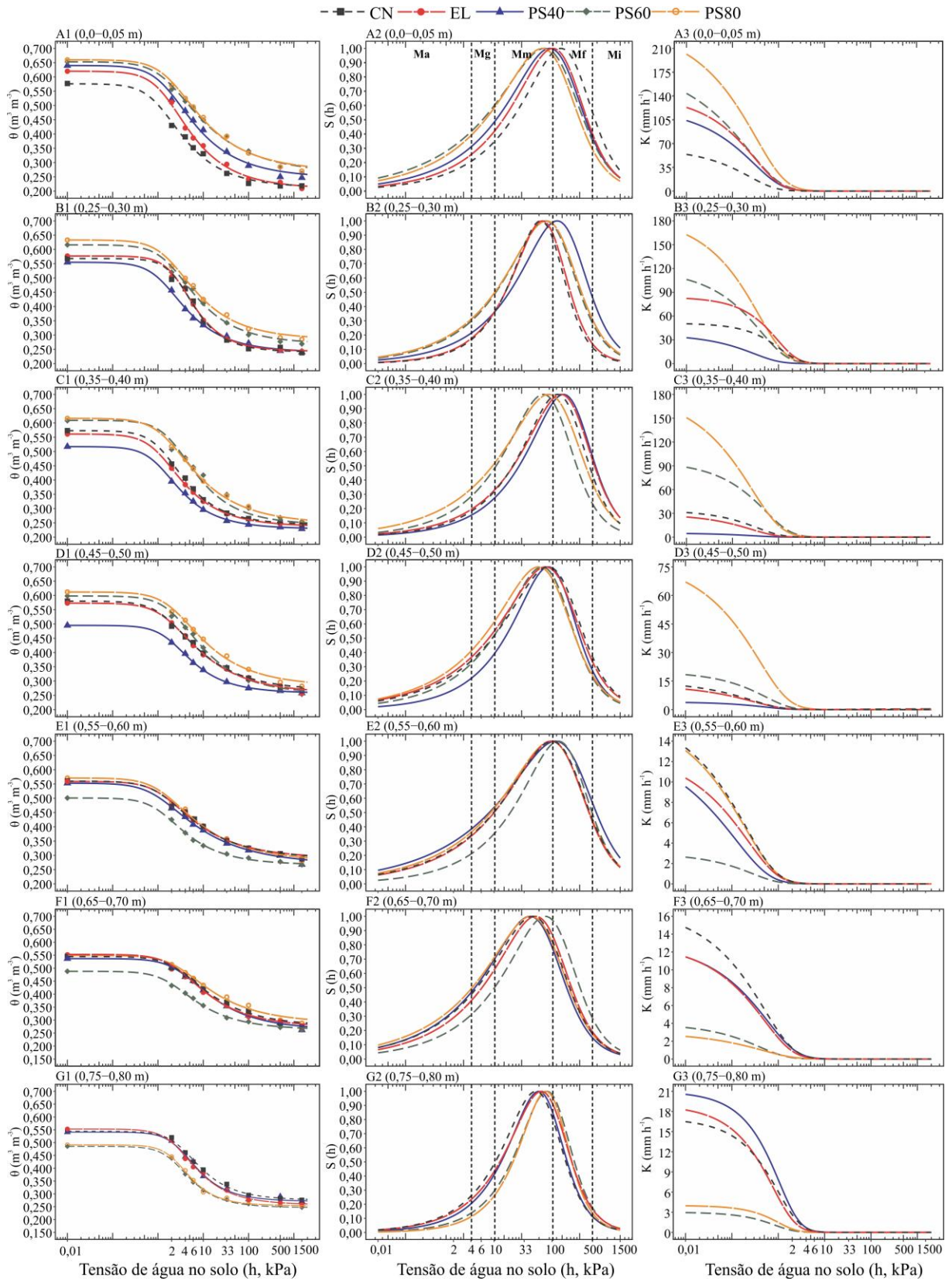


Figura 6. Curvas de retenção de água (θ , teor volumétrico de água), curvas de distribuição de poros ($S(h)$, volume de poros normalizados) e condutividade hidráulica não saturada (K) para sistemas de manejo: PS40 = Sulco de plantio preparado a 0,40 m

de profundidade, PS60 = Sulco de plantio revolvido a 0,60 m de profundidade, PS80 = Sulco de plantio revolvido a 0,80 m de profundidade, EL = entrelinha com plantio de braquiária, CN = Cerrado nativo. Classes de poros: Ma, macroporos; Mg, Mesoporos grandes; Mm, Mesoporos médios; Mf, Mesoporos finos; Mi, Microporos.

Esse aumento no volume dos mesoporos também contribui para uma maior condutividade hidráulica não saturada do solo (K) (Figura 6), que por sua vez interfere na evaporação, armazenamento e fluxo de água no perfil do solo (LEMON, 1956; YANG e YANFUL, 2002). Este resultado pode significar enorme efeito sobre a disponibilidade de água para o cafeeiro, uma vez que, o acesso à água depende do seu fluxo. Deste modo, os maiores valores de K observados nos sistemas de manejo PS60, PS80 e EL podem contribuir para a secagem mais rápida da camada superficial do Cambissolo (LEMON, 1956; YANG e YANFUL, 2002), reduzindo a disponibilidade de água ao cafeeiro. Todavia, há uma redução da K à medida que a umidade na superfície do solo diminui, pois a camada seca quebra a continuidade dos poros com o restante do perfil do solo (AYDIN et al., 2005) fazendo com que a evaporação ocorra com menor intensidade (LEMON, 1956; AYDIN et al., 2005) propiciando maior volume armazenado de água a ser explorado pelas raízes em subsuperfície.

Embora alguns tratamentos apresentem resultados benéficos até a profundidade de 0,45-0,50 m (PS60 e PS80), quanto à retenção de água, distribuição de poros e condutividade hidráulica não saturada (Figura 6), se destaca uma forte redução nessas propriedades nas profundidades de 0,35-0,50 m, 0,55-0,80 m e 0,75-0,80 m, respectivamente para PS40, PS60 e PS80. Conforme já salientando por ocasião da discussão da condutividade hidráulica saturada, é provável que isto se deva à ação da base dos implementos sobre a estrutura frágil do Cambissolo, promovendo a compactação do mesmo abaixo daquelas profundidades. Salienta-se para a não coincidência entre a profundidade de ocorrência dessas alterações indicativas de compactação com a profundidade máxima de alcance dos implementos. Isso deve ser levado em conta na tomada de decisão da profundidade de trabalho dos implementos evitando redução da eficiência desejada com as operações.

A ocorrência de compactação na camada subsuperficial do solo devido à subsolagem e enxada rotativa, já foram relatados na literatura (BORRESEN e NIJOS, 1993; ARAUJO JÚNIOR et al. (2011). Nessa linha de pesquisa, Borresen e Nijos (1993) relacionam a ocorrência da compactação à conformação da enxada rotativa, que promove um espelhamento do solo logo abaixo do ponto de contato com o solo. No presente estudo, entretanto, é

provável que o fenômeno tenha ocorrido em função da carga aplicada pela haste do subsolador, utilizado no preparo profundo do sulco de plantio, pois segundo Araujo Júnior et al. (2011) a ação desses implementos ocorre logo abaixo do limite de contato da haste com o solo. Assim, a compactação deve ter contribuído para a redução dos poros maiores, transformando-os em poros menores, o que resultou em menor movimento de água no solo, o que pode influenciar negativamente também no desenvolvimento do sistema radicular abaixo daquelas profundidades, assim como no uso de água para as plantas abaixo da camada compactada, e isto não foi investigado neste trabalho.

Em termos gerais, o presente trabalho demonstrou que o manejo adequado de Cambissolos, que morfologicamente são solos com menor potencial produtivo, pode proporcionar melhores condições no solo para a cafeicultura no tocante à dinâmica de água no perfil e desenvolvimento radicular. Todavia, estudos relatando a duração dos efeitos dessas alterações físico-hídricas decorrentes do preparo profundo do solo e implicações na longevidade e produtividade de cafeeiros não são relatados na literatura, sendo, portanto, incentivados tendo em vista a importância da cultura para vários países de clima tropical.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo buscou avaliar sistemas de preparo para Cambissolos adensados e rasos, por meio das alterações na configuração da porosidade e nas propriedades hidráulicas. A partir dos resultados obtidos, é recomendável o revolvimento do solo com enxada rotativa associado à subsolagem nas profundidades de 0,60 m e 0,80 m, pois essas técnicas melhoram a infiltração, armazenamento e movimento de água até 0,50 m de profundidade nesse solo. Aliado ao preparo na linha, o cultivo da braquiária, aumenta a infiltração de água no solo na entrelinha da cultura cafeeira, o que contribui para redução de problemas erosivos. Todavia, para o preparo na linha com o uso tanto do sulcador como do subsolador, é necessário cautela visando a evitar compactação do solo em camadas localizadas abaixo do contato da base das hastes dos equipamentos.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela concessão de bolsa de doutorado, a CAPES, FAPEMIG e Consorcio Embrapa Café pelo apoio financeiro. À UFLA e DCS pelo apoio científico.

6. REFERÊNCIAS

ARAÚJO JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALCÂNTARA, E. N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 115-131, 2011.

AYDIN, M.; YANG, S.L.; KURT, N.; YANO, T. Test of a simple model for estimating evaporation from bare soils in different environments. **Ecological Modeling**, v. 182, n. 1, p.91-105, 2005.

BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J.; FONSECA, I. C. B. Condutividade hidráulica saturada e não saturada de Latossolo Vermelho Eutroférico tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 403-407, 2004.

BELDINI, T. P.; MCNABB, K. L.; LOCKABY, B. G.; SANCHEZ, F. G.; NAVEGANTES-CÂNCIO, O. The effect of Amazonian Eucalyptus plantations on soil aggregates and organic matter density fractions. **Soil Use and Management**, v. 26, n. 1, p. 53-60, 2010.

BERNARDES, T.; MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Diagnóstico físico-ambiental da cafeicultura no estado de Minas Gerais – Brasil. **Coffee Science**, v. 7, n. 2, p. 139-151, 2012.

BESCANSÀ, P.; IMAZ, M. J.; VIRTO, I.; ENRIQUE, A.; HOOGMOED, W. B. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. **Soil and Tillage Research**, v.87, n. 1, p.19-27, 2006.

BIONDI, F.; MYERS, D. E.; AVERY, C. C. Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. **Canadian Journal of Forest Research**, 24:1354-1368, 1994.

BORGES, L.C.; FERREIRA, D. F. Poder e taxas de erro tipo I dos testes Scott-Knott, Tukey e Student-newmankeuls sob distribuições normal e não normais dos resíduos. **Revista de matemática e estatística**, v. 21, n. 1, p. 67-83, 2002.

BORRESEN, T.; NIJOS, A. Ploughing and rotary cultivation for cereal production in a long-term experiment on a clay soil in southeastern Norway - 1: soil properties. **Soil and Tillage Research**, v. 28, n. 1, p. 97-108, 1993.

BOUMA, J. Measuring the conductivity of soil horizons with continuous macropores. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 1, p. 438-441, 1982.

BRAUNACK, M. V.; DEXTER, A. R. Soil aggregation in the seedbed: a review. I - Properties of aggregates and beds of aggregates. **Soil and Tillage Research**, v. 14, n. 1, p. 259-279, 1989.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: A review. **Geoderma**, v. 124, n. 1, p. 3-22, 2005.

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Edinburgh: Waine Research Publications, 1985, 152 p.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; HECK, R. J.; ROSSONI, D. F.; CARVALHO, T. S.; COSTA, A. L. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots

and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. **Soil and Tillage Research**, v. 145, n. 1, p. 171-180, 2015.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; ROSSONI, D. F.; COSTA, A. L.; HECK, R. J. Spatial variability of pores in oxidic Latosol under a conservation management system with diferente gypsum doses. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 5, p. 445-460, 2014.

CECAFÉ – CONSELHO DOS EXPORTADORES DE CAFÉ DO BRASIL. **Monthly export statistics - November 2017**. 2018. Disponível em: <<http://www.cecafe.com.br/dados-estatisticos/exportacoes-mundiais/>>. Acesso em 25/01/2018.

CHAVES, H.M.L. et al. Previsão da infiltração sob condições dinâmicas de selamento superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 17, n. 1, p. 141-147, 1993.

COELHO, E. C.; SOUZA, E. G.; URIBE-OPAZO, M. A.; PINHEIRO NETO, R. Influência da densidade amostral e do tipo de interpolador na elaboração de mapas temáticos. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, n. 1, p. 165-174, 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de café: Primeiro Levantamento**, Brasília, v. 4, n. 1, p. 1-98, 2017. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>, ISSN 2318-7913.

CORRÊA, J. C. Características físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 20, n. 11, p. 1381-1387, 1985.

CRESSIE, N. A. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley and Sons, 1993. 900p.

CRESSIE, N. A.; HAWKING, D. M. Robust estimation of the variogram. **Mathematical Geology**, v. 12, n. 2, p. 115-25, 1980.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JUNIOR, P. J. **Model based geostatistics**. New York: Springer Series in Statistics, 2007.

EFFGEN, T. A. M.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V.; LIMA, J. S. S.; REIS, E. F.; BORGES, E. N. Propriedades Físicas do Solo in função de manejos em lavouras de cafeeiro conilon. **Revista Ceres**, v. 59, n. 3, p. 414-421, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. 3 edth revisada e ampliada. Rio de Janeiro, 2017. 573p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, 2013. 353p.

EVERTS, C.J.; KANWAR, R.S. Interpreting tension infiltrometer data for quantifying soil macropores: some practical considerations. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 36, n. 1, p. 423-428, 1992.

FOX, D. M.; DARBOUX, F.; CARREGA, P. Effects of fire-induced water repellency on soil aggregate stability, splash erosion, and saturated hydraulic conductivity for different size fractions. **Hydrological Processes**, v. 21, n. 17, p. 2377-2384, 2007.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, v.32, n. 1, p.180-186, 1968.

GUEDES, L. P. C.; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A.; SOUZA, E. G. Anisotropia no estudo da variabilidade espacial de algumas variáveis químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2217-2226, 2008.

HILL, R.L.; CRUSE, R.M. Tillage effects on bulk density and soil strength of two Mollisols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, n. 1, p.1270-1273, 1985.

IUSS Working Group WRB. (2015). **World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, Ch. J. **Mining geostatistics**. 5.ed. London, Academic Press, 1991. 600p.

JURY, W. A.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. **Soil physics**. New York: John Wiley and Sons, 1991.

KAHLON, M. S.; LAL, R.; ANN-VARUGHESE, M. Twenty-two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio. **Soil and Tillage Research**, v. 126, n. 1, p. 151-158, 2013.

KARAMI, A.; HOMAEE, M.; AFZALINIA, S.; RUHIPOUR, H.; BASIRAT, S. Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physic-chemical properties. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 148, n. 1, p. 22-28, 2012.

KAUTZ, T.; AMELUNG, W.; EWERT, F.; GAISER, T.; HORN, R.; JAHN, R.; JAVAUX, M.; KEMNA, A.; KUZYAKOV, Y.; MUNCH, J. -C.; PÄTZOLD, S.; PETH, S.; SCHERER, H. W.; SCHLOTTER, M.; SCHNEIDER, H.; VANDERBORGHT, J.; VETTERLEIN, D.; WALTER, A.; WIESENBERG, G. L. B.; KÖPKE, U. Nutrient acquisition from arable subsoils in temperate climates: a review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 57, n. 1, p. 1003–1022, 2013.

KIRKEGAARD, J. A.; LILLEY, J. M.; HOWE, G. N.; GRAHAM, J. M. Impact of subsoil water use on wheat yield. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 58, n. 1, p. 303–315, 2007.

KLUTE, A. **Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil**. In: _____. **Methods of soil analysis I: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. cap. 13, p. 210-221.

LAL, R.; VANDOREN, D. Influence of 25 years of continuous corn production by three tillage methods on water infiltration of two soils in Ohio. **Soil and Tillage Research**, v. 16, n. 1, p. 71-74, 1990.

LEMON, E.R. The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. **Soil Science Society of America Journal**, v. 20, n. 1, p.120-125, 1956.

LIMA, J.M.; CURI, N.; RESENDE, M.; SANTANA, D.P. Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta da erodibilidade em Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, n. 1, p.85-90, 1990.

MADSEN, M. D. et al. Soil water repellency within a burned pinon-juniper woodland: spatial distribution, severity, and ecohydrologic implications. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, n. 4, p. 1543-1553, 2011.

MALONE, R. W.; LONGSDON, S.; SHIPITALO, M. J.; WEATHERINGTON-RICE, J.; AHUJA, L.; MA, L. Tillage effect on macroporosity and herbicide transport in percolate. **Geoderma**, v. 116, n. 1, p. 191-215, 2003.

MELLEK, J. E; DIECKOW, J.; SILVA, V. L.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V.; VEZZANI, F. M; SOUZA, J. L. M. Dairy liquid manure and no-tillage: Physical and hydraulic properties and carbon stocks in a Cambisol of Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 1, p. 69-76, 2010.

MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; ROSA, D. P.; VIEIRA, D. A.; ROSA, V. T.; REINERT, D. J. Propriedades físico-hídricas do solo e demanda energética de haste escarificadora em Argissolo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 3, p. 315-321, 2010.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant Soil**, v. 76, n. 1, p. 319-337, 1984.

OLIVEIRA FILHO, A. T.; FONTES, M. A. L. Patterns of floristic differentiation among Atlantic Forest in South-eastern Brazil, and influence of climate. **Biotropica**, v. 32, n. 4b, p. 139-158, 2000.

OORTS, K.; BOSSUYT, H.; LABREUCHE, J.; MERCKX, R.; NICOLARDOT, B. Carbono and nitrogen stocks in relation to organic matter fractions, aggregation and pore size distribution in no-tillage and conventional tillage in northern France. **European Journal of Soil Science**, v.58, n. 1, p.248-259, 2007.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology Earth System Sciences**, v. 11, n. 5, p. 1633–1644, 2007.

PELEGRINI, F.; MORENO, F.; MARTIN-MIRANDA, J.; CAMPOS, M. The influence of tillage methods is soil physical properties and water balance for a typical crop rotation SWS Spain. **Soil and tillage Research**, v. 16, n. 2, p. 345-358, 1990.

PERROUX, K.M.; WHITE, I. Designs for disc permeameters. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, n. 1, p. 1205-1215, 1988.

PINHEIRO, E. F. M.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil. **Soil Tillage Research**, v. 77, n. 1, p. 79-84, 2004.

R CORE TEAM: **A language and environment for statistical computing**, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, 2017, URL <http://www.R-project.org/>.

RADCLIFFE, D. E.; ŠIMUNEK, J. **Soil Physics with HYDRUS: Modeling and Applications**. CRC Press, 2010. 373p.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: Base para distinção de ambientes**. 6.ed. Revisada e Ampliada, Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2014. 378p.

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, n. 1, p. 252-263, 2009.

RIBEIRO JUNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. Geor: a package from geostatistical analysis. **R-New**, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; et al. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 1, p. 1167-1175, 2007.

RITZ, C.; STREIBIG, J. C. **Nonlinear regression with R**. Springer Science. 2008, 151 p.

ROCHA, O. C.; RAMOS, M. L. G.; VEIGA, A. D.; SILVA, E. A.; GUERRA, A. F.; BARTHOLO, G. F.; RODRIGUES, G. C.; SILVA, E. Chemical and hydrophysical attributes of an Oxisol under coffee intercropped with brachiaria in the Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1476-1483, 2016.

SANTOS, D.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; EVANGELISTA, A.R.; CRUZ, A.B.; TEIXEIRA, W.G. Perdas de solo e produtividade de pastagens nativas e melhoradas sob diferentes práticas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 2, p. 183-189, fev. 1998.

SCHERPINSKI, C.; URIBE-OPAZO, M. A.; VILAS BOAS, M. A.; SAMPAIO, S. C.; JOHANN, J. A. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 7-13, 2010.

SCHNEIDER, F.; DON, A.; HENNINGS, I.; SCHMITTMANN, O.; SEIDEL, S. J. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know?. **Soil and Tillage Research**, v. 174, n. 1, p. 193-204, 2017.

SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; LIMA, J. M.; SILVA, B. M.; ZEVIANI, W. M.; LIMA, V. M. P. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.17, n. 4, p. 362-370, 2013a.

SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; OLIVEIRA, A. S.; LIMA, J. M.; GUIMARÃES, P. T. G.; COSTA, J. C. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: Um estudo de caso. **Bioscience Journal**, v.27, p.964-977, 2011.

SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; VITORINO, A. C. T.; SILVA, B. M.; CARDUCCI, C. E. Qualidade física e intervalo hídrico ótimo em Latossolo e Cambissolo, cultivados com cafeeiro, sob manejo conservacionista do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 733-742, 2013b.

SILLMANN, J.; KHARIN, V. V.; ZWIERS, F. W.; ZHANG, X.; BRONAUGH, D. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: part 2. Future climate projections. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 1, p. 2473–2493, 2013.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA, E. A.; FERREIRA, M. M.; NORTON, L. D.; CURI, N. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic Latosol as affected by soil management. **Soil and Tillage Research**, v. 154, n. 1, p. 103-113, 2015.

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

SILVA, R. F.; SANTOS, G. G.; NÓBREGA, J. C. A.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS, B. O.; SANTOS, D. P.; SILVA JÚNIOR, J. P. Impacts of land-use and management systems on organic carbon and water-physical properties of a Latossolo Amarelo (Oxisol). **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 1, p. 109-124, 2017.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12th ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service; 2014.

SOIL SURVEY STAFF. **Soil survey manual**. Washington, USDASCS. U.S. Gov. Print. Office, 1993. 437p. (Handbook, 18)

THOMASSON, A.J. Towards an objective classification of soil structure. **Journal of Soil Science**, v.29, p.38-46, 1978.

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

VALENTIN, C.; BRESSON, L. M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**, v.55, p.225-245, 1992.

VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 1, p. 892-898, 1980.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag New York, 2009.

WIESMEIER, M.; HÜBNER, R.; BARTHOLD, F.; SPÖRLEIN, P.; GEUß, U.; HANGEN, E.; REISCHL, A.; SCHILLING, B.; VON LÜTZOW, M.; KÖGEL-KNABNER, I. Amount, distribution and driving factors of soil organic carbon and nitrogen in cropland and grassland soils of southeast Germany (Bavaria). **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 176, n. 1, p. 39–52, 2013.

YANG, M. D.; YANFUL, E. K. Water balance during evaporation and drainage in cover soils under different water Table conditions. **Advances in Environmental Research**, v. 6, n. 1, p. 505-521, 2002.