

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal

Samuel Dias Moreira

**VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE UNIDADE DE SUCÇÃO E O EFEITO DA
INTERAÇÃO DA COMPACTAÇÃO E UMIDADE DO SOLO EM DIFERENTES
SISTEMAS DE CULTIVO E NA FISIOLOGIA DO CAFEIRO**

Diamantina - MG

2019

Samuel Dias Moreira

**VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE UNIDADE DE SUÇÃO E O EFEITO DA
INTERAÇÃO DA COMPACTAÇÃO E UMIDADE DO SOLO EM DIFERENTES
SISTEMAS DE CULTIVO E NA FISIOLOGIA DO CAFEIRO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Produção Vegetal da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, nível DOUTORADO, como parte dos requisitos para a obtenção do título de DOUTOR EM PRODUÇÃO VEGETAL.

Orientador: Prof. Dr. André Cabral França
Coorientador: Prof. Dr. Wellington Willian Rocha

Diamantina - MG

2019

Elaborado com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M838v

Moreira, Samuel Dias

Validação de um protótipo de unidade de sucção e o efeito da interação da compactação e umidade do solo em diferentes sistemas de cultivo e na fisiologia do cafeeiro / Samuel Dias Moreira. 2019. 70 p. : il.

Orientador: André Cabral França

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2019.

1. Déficit hídrico. 2. Estresse abiótico. 3. Tráfego de máquinas. 4. Física do solo. I. França, André Cabral. II. Título. III. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.

CDD 631.4

Samuel Dias Moreira

**VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE UNIDADE DE SUCCÃO E O EFEITO DA
INTERAÇÃO DA COMPACTAÇÃO E UMIDADE DO SOLO EM DIFERENTES
SISTEMAS DE CULTIVO E NA FISIOLOGIA DO CAFEIEIRO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Produção Vegetal da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, nível DOUTORADO como parte dos requisitos para obtenção do título de DOUTOR EM PRODUÇÃO VEGETAL.

Orientador: Prof. Dr. André Cabral França

Coorientador: Prof. Dr. Wellington Willian Rocha

Data de aprovação: 24/05/2019

Prof.^a Dr.^a Rita de Cassia Ribeiro Carvalho – UEMG

Prof. Dr. Ricardo Siqueira da Silva – UFVJM

Prof. Dr. Wellington Willian Rocha – UFVJM

Prof. Dr. André Cabral França – UFVJM
Presidente

Diamantina – MG

2019

OFEREÇO

A Deus, por estar sempre ao meu lado, iluminando meu caminho e dando-me força nos momentos mais difíceis. E a todas as pessoas que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

DEDICO

À minha mãe, Laudinice, pela dedicação e compreensão, ao meu pai, Pedro, que está cuidando de mim lá do céu; às minhas irmãs, Ianny e Luiza, e aos amigos e professores que estiveram comigo em toda essa trajetória.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelos ensinamentos, sempre me guiando pelo caminho correto, pela saúde e força que me foi concedida, para enfrentar os desafios que surgiram ao longo dessa jornada e, sobretudo, pelo dom da vida.

À minha família, pelo carinho, força, dedicação, incentivo e amor dedicados todos esses anos.

À Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, de maneira especial ao Departamento de Agronomia e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, pela oportunidade de realização do doutorado e pela contribuição à minha formação acadêmica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão de bolsa de estudos.

Aos professores Dr. André Cabral França e Dr. Wellington Willian Rocha, pelos ensinamentos, orientação e exemplo de profissional, e, principalmente, pela amizade.

Aos técnicos de laboratórios e funcionários Fabiano, Múcio, Eglerson e Teodoro, pelo apoio e auxílio nas atividades de laboratório e de campo.

Aos professores da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, pelos ensinamentos e conhecimentos transmitidos durante minha formação acadêmica.

Aos amigos de curso e da vida, por toda amizade e companheirismo, e um agradecimento especial para Christina, pelos conselhos, apoio e estar sempre ao meu lado.

Aos colegas do grupo de estudos NECAF, pela amizade, ensinamentos e ajuda nos experimentos.

A todos que, diretamente e indiretamente, contribuíram para esta conquista, “Doutor”.

Obrigado!

RESUMO

SAMUEL DIAS MOREIRA. **Validação de um protótipo de unidade de sucção e o efeito da interação da compactação e umidade do solo em diferentes sistemas de cultivo e na fisiologia do cafeeiro.** 2019. 70p. (Tese - Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2019.

As máquinas, cada vez mais, são indispensáveis para uma produção rentável na agricultura, porém, o mau uso dessa tecnologia pode trazer prejuízos, como a compactação do solo. As máquinas e os implementos podem exercer alta pressão sobre o solo, provocando a sua compactação. A compactação do solo varia com o tipo de sistema de cultivo, alguns mais intensivos e outros menos. Com a realização deste estudo, objetivou-se avaliar os diferentes sistemas de cultivo sobre alterações dos atributos físicos do solo, bem como o efeito da compactação e da umidade do solo sobre as plantas. Quatro experimentos foram realizados, dois em campo e dois em casa de vegetação. No primeiro experimento validou-se um equipamento construído com tubos de PVC e areia, denominado mesa de tensão, para a determinação da umidade do solo de acordo com a tensão exercida. Esse equipamento alternativo de baixo custo pode facilitar o acesso dos produtores à determinação da capacidade de campo. No segundo experimento avaliaram-se os manejos de cultivo sobre as alterações nos atributos físicos do solo que incluem sistemas de plantio direto e convencionais, sistemas irrigados e não irrigados. Os dois experimentos se basearam na coleta de amostras no campo e em análise no laboratório. Os resultados apontaram que a mesa de tensão é uma alternativa viável para determinar a umidade do solo em baixas tensões, mas necessita de fatores de correção para ser utilizada. Os solos dos manejos de cultivo estudados não estão compactados, de acordo com os atributos físicos avaliados, porém, constataram-se alterações nesses atributos, em comparação com a mata natural. No terceiro e no quarto experimento avaliaram-se o crescimento e a resposta fisiológica do café, respectivamente, submetidos à diferentes umidades e graus de compactação do solo. Observou-se, nos resultados, que a limitação do crescimento das raízes, a diminuição do sistema radicular e a falta de água são as principais causas do decréscimo das respostas fisiológicas e do crescimento do cafeeiro. Aliada a esses fatores, a compactação subsuperficial do solo inibe as respostas fisiológicas e o crescimento inicial do cafeeiro, o que é agravado quando associada ao déficit hídrico.

Palavras chave: Déficit hídrico, estresse abiótico, tráfego de máquinas, física do solo.

ABSTRACT

SAMUEL DIAS MOREIRA. **Validation of a suction unit prototype and the effect of soil compaction and moisture interaction on different cropping systems and on coffee physiology.** 2019. 70p. Thesis Dissertation (Doctorate in Vegetable Production) - Federal University of the Jequitinhonha and Mucuri Valley, Diamantina, 2019.

Machines are increasingly indispensable for a profitable production for agriculture, but the misuse of this technology can cause damages, such as soil compaction. Agricultural machinery and implements can exert high pressure on the ground causing compaction. Soil compaction varies with the type of cropping systems, some more intensive and some less. This study aimed to evaluate different cropping systems on changes in soil physical attributes, as well as the effect of soil compaction and moisture on plants. Four experiments were performed, two in the field and two in a greenhouse. The first experiment validated a built equipment of PVC tubing and sand, called tension table, to determine soil moisture according to the tension. This alternative low cost equipment can facilitate the access of farmers to determine the field capacity. The second experiment evaluated crop management on changes in soil physical attributes including no-till and conventional tillage, irrigated and non-irrigated systems. Both experiments were based on field sampling and laboratory analysis. The results showed that the tension table is a viable alternative to determine soil moisture at low tension, but needs correction factors to be used. The soils of the cultivation management studied are not compacted according to the physical attributes evaluated, however, there were changes in the attributes compared to the natural forest. The third and fourth experiments evaluated the growth and physiological response of coffee, respectively, submitted to different soil moisture and degrees of soil compaction. Results showed that root growth limitation, root system reduction, and lack of water are the main causes of decreased physiological responses and coffee growth. Allied to these factors, subsurface soil compaction inhibits physiological responses and the initial growth of coffee, which is aggravated when associated with water deficit.

Keywords: Water deficit, abiotic stress, machine traffic, soil physics.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO CIENTÍFICO I. Construção e validação de uma mesa de tensão de baixo custo	Pág.
Figura 1 Mesa de tensão construída em colunas de PVC com areia. A) Vista geral do equipamento; B) bandeja com amostras de solo; C) detalhes das conexões de PVC.....	10
ARTIGO CIENTÍFICO II. Compressibilidade, velocidade de infiltração básica e resistência à penetração de um latossolo sob diferentes sistemas de cultivo	
Figura 1 Modelagem da pressão de pré-consolidação, em função da umidade para os diferentes sistemas de cultivo: mata natural - controle (Y_{MT}), plantio direto com milho e soja (Y_{PD}), plantio convencional com milho (Y_{PC}), pastagem não irrigada (Y_{PNI}) e pastagem irrigada (Y_{PI})	28
Figura 2 Junção das modelagens da pressão de pré-consolidação, em função da umidade para os sistemas de cultivo com comportamento semelhante: mata natural - controle (Y_{MT}), plantio direto com milho e soja (Y_{PD}), plantio convencional com milho (Y_{PC}), pastagem não irrigada (Y_{PNI}) e pastagem irrigada (Y_{PI})	30
Figura 3 Resistência à penetração do solo sob pastagem irrigada (Y_{PI}) e pastagem não irrigada (Y_{PNI}) em diferentes umidades	33
ARTIGO CIENTÍFICO III. O déficit hídrico potencializa os efeitos da compactação do solo no crescimento do café recém-plantado?	
Figura 1 Ilustração representativa da coluna de policloreto de vinila	43
Figura 2 Altura (a), diâmetro do caule (b) e número de ramos plagiotrópicos (c) do cafeeiro para diferentes umidades do solo sob diferentes densidades relativas do solo (graus de compactação), na profundidade de 30 a 40 cm. Capacidade de campo do solo (CC) e déficit hídrico (DH) = 50 % da CC.....	46
Figura 3 Número de folhas (a), área foliar (b), peso seco das folhas (c) e peso seco do caule (d) do cafeeiro para diferentes umidades do solo sob diferentes densidades relativas do solo (graus de compactação), na profundidade de 30 a 40 cm. Capacidade de campo do solo (CC) e déficit hídrico (RH) = 50% da CC	47
Figura 4 Peso seco da raiz do cafeeiro para diferentes profundidades do solo sob déficit hídrico (50% da capacidade de campo do solo = $0,17 \text{ kg kg}^{-1}$).....	49

ARTIGO CIENTÍFICO IV. Interação compactação e umidade do solo nas respostas fisiológicas de mudas de café recém-plantadas		Pág.
Figura 1	Ilustração representativa da coluna de policloreto de vinila	57
Figura 2	Taxa fotossintética (A), carbono consumido (B), concentração de CO ₂ na câmara subestomática (C) e relação carbono interno/carbono atmosférico (C _i /C _a) (D) do <i>Coffea arabica</i> L. (Rubi MG-1192) nas diferentes umidades e em diferentes densidades relativa do solo (graus de compactação), na profundidade de 30 a 40 cm; capacidade de campo do solo (CC) e restrição hídrica (RH) = 50 % da CC	60
Figura 3	Condutância estomática de vapores de água (A), temperatura da folha (B), uso eficiente da água (C) e taxa de crescimento absoluto do cafeeiro (D) do <i>Coffea arabica</i> L. (Rubi MG-1192) nas diferentes umidades e em diferentes densidades relativa do solo (graus de compactação), na profundidade de 30 a 40 cm; capacidade de campo do solo (CC) e restrição hídrica (RH) = 50% da CC	61
Figura 4	Razão sistema radicular do cafeeiro por camada de solo (RSRC) do <i>Coffea arabica</i> L. (Rubi MG-1192) em diferentes densidades relativa do solo (graus de compactação), na profundidade de 30 a 40 cm, sob diferentes profundidades do solo. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula dentro de cada densidade relativa e minúscula dentro de cada profundidade não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade	63

LISTA DE TABELAS

ARTIGO CIENTÍFICO I. Construção e validação de uma mesa de tensão de baixo custo		Pág.
Tabela 1	Densidade (DS), textura e matéria orgânica (MO) do solo dos diferentes sistemas de cultivo.....	14
Tabela 2	Modelos lineares ajustados para os diferentes sistemas de cultivo nas diferentes tensões de retenção de água no solo, comparando-se duas mesas de tensão igualmente construídas	15
Tabela 3	Modelos lineares ajustados para os diferentes sistemas de cultivo nas diferentes tensões de retenção de água no solo, comparando-se a mesa de tensão construída com a câmara de pressão de Richards	15
Tabela 4	Significância entre os modelos ajustados para os diferentes sistemas de cultivo na mesa de tensão e na câmara de pressão de Richards	16
Tabela 5	Valores das umidades médias do solo nas tensões de retenção de água de 6 e 10 kPa, para a mesa de tensão e a câmara de pressão de Richards, e os fatores de correção para as umidades	17
 ARTIGO CIENTÍFICO II. Compressibilidade, velocidade de infiltração básica e resistência à penetração de um latossolo sob diferentes sistemas de cultivo		
Tabela 1	Resultado da análise textural do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico localizado na Fazenda Experimental da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), localizada na cidade Passos, MG	25
Tabela 2	Teste de significância, de acordo com Snedecor e Cochran (1989), entre as curvas de pressão de pré-consolidação de um Latossolo Vermelho-Amarelo nos diferentes sistemas de cultivo	29
Tabela 3	Valores de pressão de pré-consolidação na umidade referente à capacidade de campo e ao volume total de poros para os manejos de cultivo	31
Tabela 4	Valores da velocidade de infiltração básica de água no solo (VIB), densidade do solo (DS), umidade na capacidade de campo (UCC) e teor de matéria orgânica (MO)	32
Tabela 5	Valores médios da resistência do solo à penetração (RP) na capacidade de campo e na umidade média do solo durante o ano conduzido em sequeiro.....	34

ARTIGO CIENTÍFICO III. O déficit hídrico potencializa os efeitos da compactação do solo no crescimento do café recém-plantado? Pág.

Tabela 1	Caracterização do Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico (Ferralsols) utilizado para cultivo do cafeeiro antes da adubação	44
Tabela 2	Peso seco total da raiz do cafeeiro sob diferentes umidades do solo e peso seco das raízes (g) para diferentes profundidades do solo sob diferentes graus de compactação do solo	48

ARTIGO CIENTÍFICO IV. Interação compactação e umidade do solo nas respostas fisiológicas de mudas de café recém-plantadas

Tabela 1	Caracterização do Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico (Ferralsols) utilizado para cultivo do cafeeiro antes da adubação	58
Tabela 2	Taxa transpiratória e razão peso radicular do cafeeiro do <i>Coffea arabica</i> L. (Rubi MG-1192) na capacidade de campo 50% e 100%	62

SUMÁRIO

	Pág.
RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	v
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3
ARTIGO CIENTÍFICO I - CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UMA MESA DE TENSÃO DE BAIXO CUSTO	7
RESUMO	7
ABSTRACT	8
1 - INTRODUÇÃO	9
2 - MATERIAL E MÉTODOS	10
2.1 - Construção da mesa de tensão	10
2.2 - Funcionamento da mesa de tensão	11
2.3 - Descrição dos locais de estudo	11
2.4 - Coletas e análises dos solos	12
2.5 - Validação da mesa de tensão	13
3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
4 - CONCLUSÃO	18
5 – AGRADECIMENTOS	18
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
ARTIGO CIENTÍFICO II - COMPRESSIBILIDADE, VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO BÁSICA E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE UM LATOSSOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO	21
RESUMO	21
ABSTRACT	22
1 - INTRODUÇÃO	23
2 - MATERIAL E MÉTODOS	24
2.1 - Local do estudo	24
2.2 - Descrição dos sistemas de cultivo	24
2.3 - Avaliações físicas do solo	26
3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4 - CONCLUSÕES	34
5 – AGRADECIMENTOS	35
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

	Pág.
ARTIGO CIENTÍFICO III - O DÉFICIT HÍDRICO POTENCIALIZA OS EFEITOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO NO CRESCIMENTO DO CAFÉ RECÉM-PLANTADO?	39
RESUMO	39
ABSTRACT	40
1 - INTRODUÇÃO	41
2 - MATERIAL E MÉTODOS	42
2.1 - Local do estudo	42
2.2 - Delineamento experimental	42
2.3 - Produção de mudas	42
2.4 - Recipiente, substrato e compactação do solo	42
2.5 - Condução do experimento	44
2.6 - Análise estatística	44
3 - RESULTADOS	44
4 - DISCUSSÃO	49
5 - CONCLUSÕES	50
6 – AGRADECIMENTOS	51
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
ARTIGO CIENTÍFICO IV – INTERAÇÃO COMPACTAÇÃO E UMIDADE DO SOLO NAS RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DE MUDAS DE CAFÉ RECÉM-PLANTADAS	53
RESUMO	53
ABSTRACT	54
1 - INTRODUÇÃO	55
2 - MATERIAL E MÉTODOS	56
2.1 - Local do estudo	56
2.2 - Delineamento experimental	56
2.3 - Produção de mudas	56
2.4 - Recipiente, substrato e compactação do solo	56
2.5 - Condução do experimento e avaliação	58
2.6 - Análise estatística	59
3 - RESULTADOS	59
4 - DISCUSSÃO	63
5 - CONCLUSÕES	66
6 – AGRADECIMENTOS	66
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
CONCLUSÃO GERAL.....	70

INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente se discute muito sobre o desenvolvimento sustentável, e a compactação do solo tem sido um fator limitante para que isso seja alcançado. A compactação ocorre de forma naturalmente ou devido a manejo inadequado (MARTINS, 2012), sendo um dos principais fatores que favorecem a degradação de áreas cultivadas, além de ser responsável pela alteração da estrutura física do solo e afetar negativamente a produção da cultura implantada.

Os sistemas de cultivo influenciam a compactação do solo; o menor impacto vem dos sistemas de cultivo mínimo, em que o uso de máquinas agrícolas é reduzido. O uso racional do solo é objeto de estudo e discussões em função da busca de manejos corretos para agricultura sustentável e técnicas para avaliar o grau de compactação (ROCHA et al., 2002; GONTIJO et al., 2007; CARVALHO et al., 2010; PIRES et al., 2012; SOUZA et al., 2013; STEFANOSKI et al., 2013; NEIVA JÚNIOR et al., 2015; OLIVEIRA; LIMA; JAN VERBURG et al., 2015). As técnicas de avaliação da qualidade do solo são extremamente necessárias para identificar as perturbações no solo causadas pelos diferentes manejos agrícolas.

A compactação pode ser avaliada por meio da resistência à penetração, a qual pode ser determinada com o penetrômetro eletrônico ou manual, ficando comprovada quando atinge valores acima de 2 Mpa na umidade de capacidade de campo. Alternativas para avaliar a susceptibilidade à compactação de um solo são o ensaio de Proctor Normal (VARGAS, 1997) e a umidade ótima de compactação pressão crítica de cisalhamento (ROCHA et al., 2007).

A compactação tem grande influência na redução da condutividade hidráulica do solo saturado, pois diminui a quantidade de macroporos. Assim, a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado é também utilizada na determinação quantitativa e qualitativa do movimento de água no solo e no dimensionamento de sistemas de drenagem, relacionando suas características físicas e hídricas. O entendimento do fluxo de água no solo é fundamental para a compreensão dos processos de infiltração e escoamento de água, em estudos de erosão e lixiviação de substâncias químicas e na capacidade de infiltração dos solos (SCHULER et al., 2003).

A curva de retenção de água relaciona a quantidade de água com a energia de sua retenção no solo (FIGUEIRAS et al., 2016). Em solos não saturados, essa curva é uma ferramenta importante na descrição do seu comportamento físico-químico e na sua mecânica (LUCAS et al., 2011). Na irrigação é possível, por meio desse comportamento, estimar a

disponibilidade de água no solo para as plantas e definir o ponto de murcha permanente e a sua capacidade de campo (FIGUEIRAS et al., 2016).

A capacidade de campo destaca-se no manejo de irrigação, pois permite aplicar uma lâmina de água sem excesso de lixiviação e definir o estado hídrico do solo (DE JONG VAN LIER, 2017). Sua definição clássica é a seguinte: “é a quantidade de água retida pelo solo depois que o excesso de água foi drenado e a taxa de movimento descendente da água foi decrescido acentuadamente, o que, geralmente, ocorre dentro de 2 ou 3 dias após uma chuva ou irrigação no solo permeável de estrutura e textura uniforme” (VIEHMEYER; HENDRICKSON, 1949, tradução nossa).

No setor agrícola do Brasil, a cafeicultura é uma das atividades de maior importância (CARVALHO et al., 2017), mas o cultivo do café é limitado por altas temperaturas e precipitações irregulares, além de grandes prejuízos com a ocorrência de veranicos, cada vez mais frequentes. A irrigação permite o cultivo do cafeeiro mesmo em situações limitantes, como a escassez de chuvas (DOMINGHETTI et al., 2014). Esta tecnologia é necessária em situação de seca e tem o propósito de suprir as necessidades hídricas, estimular o desenvolvimento, aumentar a produção e obter bebida de qualidade (SILVA et al., 2011).

O Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo; no ano de 2017, as exportações alcançaram, aproximadamente, 31 milhões de sacas e receita de US\$ 5,24 bilhões. Nesse mesmo ano, o café destacou-se ocupando a quinta posição entre os produtos mais exportados pelo agronegócio brasileiro. As exportações do complexo cafeeiro, de 2012 a 2017, totalizaram 200 milhões de sacas de café, representando US\$ 35 bilhões (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA, 2019). A safra de 2018 atingiu 61,66 milhões de sacas de café beneficiado e a área plantada no país totaliza 2,16 milhões de hectares (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2019).

Atualmente, o café é uma relevante fonte de renda para milhares de produtores, cerca de 300 mil, principalmente pequenos, e beneficiando, aproximadamente, 1.900 municípios. A cadeia produtiva do café gera mais de oito milhões de empregos no Brasil, proporcionando sustentabilidade econômica e acesso à saúde e educação para os trabalhadores e suas famílias (MAPA, 2019). Dessa maneira, a cafeicultura constitui uma importante atividade no desenvolvimento do Brasil, principalmente nas questões sócio- econômicas, por sua participação na geração de renda e oportunidades de emprego.

As máquinas têm papel importante na cafeicultura com sistema tecnificado, sendo utilizadas nas diversas etapas do processo de produção da cultura, como preparo do solo,

plantio, fertilização, controle sanitário (plantas daninhas, pragas e doenças) e, principalmente, colheita. A colheita mecanizada é mais viável do que a colheita manual, pois proporciona melhor resposta dos indicadores econômicos (LANNA; REIS, 2012), redução no custo operacional e maior rendimento (SANTINATO et al., 2015). Porém, o tráfego de máquinas aumenta a suscetibilidade à compactação do solo, pois as entrelinhas do cafeeiro são estreitas e frequentemente submetidas ao tráfego de máquinas e implementos (IORI et al., 2014).

Os sistemas de cultivo (plantio convencional, plantio direto e cultivo mínimo) diferenciam-se, principalmente, quanto ao preparo do solo, e isso influencia a alteração da sua estrutura física. As operações de revolvimento do solo, aração e gradagem, são medidas para melhorar sua estrutura, porém, essa ação é realizada apenas nas camadas superficiais, de 0 a 30 cm. As camadas subsuperficiais do solo, abaixo de 30 cm, não são monitoradas e a sua compactação pode aumentar com o preparo das camadas superficiais. As cargas aplicadas são pouco monitoradas na agricultura, mas sua importância está diretamente ligada à compactação do solo. Quando o tráfego de máquinas e de implementos ou o pisoteio animal excedem a capacidade de suporte de carga do solo, ocorre sua deformação plástica.

Diante dos problemas abordados, existem poucos estudos na área de avaliação da estrutura física do solo utilizando a pressão de pré-consolidação, principalmente em sistemas irrigados. Faltam pesquisas sobre compactação do solo na camada subsuperficial, principalmente cafeeiro, sendo uma cultura de grande importância para o Brasil. Também, devido à importância da determinação da tensão de retenção de água no solo, buscam-se equipamentos alternativos de baixo custo para torná-los mais acessíveis aos produtores.

Este estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito dos diferentes sistemas de cultivo na compactação do solo e na retenção de água, e o impacto destes fatores no crescimento e na resposta fisiológica do cafeeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, L. C. C. et al. Geostatistical analysis of Arabic coffee yield in two crop seasons. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.21, n. 6, p.410-414, jun. 2017.

CARVALHO, R. C. R. et al. Soil shear strength under non-irrigated and irrigated short duration grazing systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n. 3, p.631-638, maio/jun. 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Boletim da Safra de Café: Boletim Café janeiro 2019**. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>>. Acesso em: 09 de maio de 2019.

- DE JONG VAN LIER, Q. Field capacity, a valid upper limit of crop available water? **Agricultural Water Management**, v. 193, p. 214–220, nov. 2017.
- DOMINGHETTI, A. W. et al. Doses de fósforo e irrigação na nutrição foliar do cafeeiro. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v.18, n. 12, p.1235–1240, dez. 2014.
- FILGUEIRA, R. et al. Modelos de curva de retenção de água no solo. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, Irriga & Inovagri, v. 1, n. 1, p. 115-120, 2016.
- GONTIJO, I. et al. Planejamento amostral da pressão de preconsolidação de um latossolo vermelho distroférrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1245-1254, nov./dez. 2007.
- IORI, P. et al. Influence of field slope and coffee plantation age on the physical properties of a Red-Yellow Latosol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 107-117, jan./fev. 2014.
- LANNA, G. B. M.; REIS, R. P. Influence of harvest mechanization in economic and financial viability of coffee farming in southern Minas Gerais. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 110-121, 2012.
- LUCAS, J. F. R. et al. Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 1957-1973, nov./dez. 2011.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Café no Brasil**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/cafe>>. Acesso em: 09 de maio de 2019.
- MARTINS, P. C. C. **Capacidade de Suporte de Carga de Diferentes Classes de solos Submetidas a diferentes usos**. 2012, 100 p. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.
- SCHULER, A. E. et al. Propriedades físicas dos solos na parametrização dos modelos hidrológicos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.8, n.1, p. 61-70, jan./mar. 2003.
- NEIVA JÚNIOR, E. et al. Compressibility and penetrability of latossolo Vermelho-amarelo distrófico (oxisol) under varied Management systems and land uses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 86-93, jan./fev. 2015.
- OLIVEIRA, D. M. S.; LIMA, R. P.; JAN VERBURG, E. E. Qualidade física do solo sob diferentes sistemas de manejo e aplicação de dejetos líquidos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.3, p.280–285, mar. 2015.
- PIRES, L. F. et al. Soil physico-hydrical properties changes induced by weed control methods in coffee plantation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, Netherlands, v. 246, p. 261-268, ago. 2017.

ROCHA, W. W. et al. Resistência ao cisalhamento do solo do ponto de vista ambiental. In. Mauro. Belo Horizonte, **Ciência Ambiental**, 2007. p.87-124.

ROCHA, W. W. et al. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 297-303, abr./jun. 2002.

SANTINATO, F. et al. Economic analysis of harvesting coffee using repeat operations. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 3, p. 402-411, jul./set. 2015.

SILVA, A. C. da et al. Evapotranspiração e coeficiente de cultura do cafeeiro irrigado por pivô central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, p. 1215-1221, dez. 2011.

SOUZA, I. A. et al. Physical properties of a Red-Yellow Latosol and productivity of a signalgrass pasture fertilized with increasing nitrogen doses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1549-1556, nov./dez. 2013.

STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, dez. 2013.

VARGAS, M. **Introdução a Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1977. 509p.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. **Soil Science**, v.68, n. 1, p.75-94, jul. 1949.

Artigo I

CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UMA MESA DE TENSÃO DE BAIXO CUSTO**RESUMO**

A câmara de pressão de Richards é o método mais tradicional e considerado padrão para determinar as tensões de retenção de água no solo, porém, tem a desvantagem do elevado custo de aquisição. A mesa de tensão é um equipamento alternativo para o método de Richards de baixo custo e construção variada. Neste trabalho objetivou-se construir uma mesa de tensão de baixo custo e fácil montagem para determinar a tensão de retenção de água no solo. Posteriormente, buscou-se validar a mesa de tensão construída, comparando-a com a câmara de pressão de Richards, por meio de modelos matemáticos lineares, utilizando amostras de solo de diferentes sistemas de cultivo. Coletaram-se amostras de Latossolos em diferentes sistemas, como pastejo extensivo, cultivo de milho, cultivo de tifton (*Cynodon* spp.), pastejo rotacionado com *Urochloa brizantha* (Syn. *Brachiaria brizantha*), cultivo de cana-de-açúcar e mata natural (controle). Em todos os sistemas foram realizadas as análises de granulometria, de densidades e de matéria orgânica do solo. As tensões de retenção de água aplicadas foram de 2; 4; 6; 8; 10 e 12 kPa. A área sob cultivo de tifton, mesmo com o maior teor de matéria orgânica, promotor da resistência do solo à compactação, apresentou maior densidade do solo, seguida pelo pastejo rotacionado. Este fato pode ser explicado pelo intenso tráfego de máquinas em área irrigada sem o controle da carga aplicada no solo e o manejo inadequado da água. O excesso de carga animal para o pastejo rotacionado, sem a preocupação da pressão aplicada, ocasionou a maior densidade do solo. Os valores da mesa de tensão foram diferentes da câmara de pressão de Richards, sendo necessário o fator de correção para utilizar o equipamento com precisão. A mesa de tensão foi construída com materiais que sobram de construção civil, sem custos financeiros. Mas, com a compra de materiais novos, os gastos seriam em torno de 200 reais. A mesa de tensão construída em colunas de PVC com areia foi de baixo custo, fácil montagem e manuseio, e viável para determinar retenção de água no solo em baixas tensões.

Palavras-chave: Capacidade de campo, compactação, sistemas agrícolas, extrator de Richards.

CONSTRUCTION AND VALIDATION OF A LOW COST TENSION TABLE

ABSTRACT

Richards Pressure Chamber is the most traditional method and considered standard for determining soil water retention stresses, however, has the disadvantage of high acquisition cost. The tension table is alternative equipment for the low cost Richards method and varied construction. The objective of this study was to construct a low cost tension table and easy assembly to determine the soil water retention tension. Subsequently, we tried to validate the built tension table, comparing it with the Richards Pressure Chamber, using linear mathematical models and soil samples from different cultivation systems. Oxisols samples were collected in different systems such as extensive grazing, corn cultivation, tifton cultivation (*Cynodon* spp.), *Urochloa brizantha* rotated grazing (Syn. *Brachiaria brizantha*), sugar cane cultivation and natural forest (control). In all systems were analyzed the granulometry, the densities and the organic matter of the soil. The water retention tension applied to the soil samples were 2; 4; 6; 8; 10 and 12 kPa. The area under tifton cultivation, even with the highest organic matter content, promoting soil compaction resistance, presented higher soil density, followed by rotational grazing. This fact can be explained by the heavy traffic of machines in irrigated area without the control of the applied load on the ground and the inadequate water management. Excessive animal load for rotational grazing, without concern for the applied pressure, caused the highest soil density. Tension table values were different from Richards pressure chamber, and the correction factor was required to use the equipment accurately. The tension table was built with materials left over from construction, with no financial costs. But with the purchase of new materials, the expenses would be around 200 reais. The tension table built from sand-PVC columns was inexpensive, easy to assemble and handle, and feasible to determine soil water retention at low tension.

Keywords: Field capacity, soil compaction, agricultural systems, Richards extractor.

1 - INTRODUÇÃO

A curva de retenção de água é uma das variáveis relacionadas à propriedade hidráulica do solo, desempenhando papel de destaque no transporte de solutos (SHWETHA; VARIJA, 2015), na movimentação de água, no desenvolvimento de plantas e na regulação da dinâmica da umidade do solo (GAO et al., 2018).

A curva de retenção de água relaciona a quantidade de água com a energia proveniente de sua retenção no solo (FIGUEIRAS et al., 2016). Em solos não saturados, essa curva é uma ferramenta crucial na descrição do comportamento físico-químico e na mecânica desses solos (LUCAS et al., 2011). Na irrigação é possível, por meio desse comportamento, estimar a disponibilidade de água no solo para as plantas e definir o ponto de murcha permanente e a capacidade de campo do solo (FIGUEIRAS et al., 2016).

A capacidade de campo destaca-se no manejo de irrigação, pois permite aplicar uma lâmina de água sem excesso de lixiviação e definir o estado hídrico do solo (DE JONG VAN LIER, 2017). De acordo com sua definição clássica, “é a quantidade de água retida pelo solo depois que o excesso de água foi drenado e a taxa de movimento descendente da água foi decrescido acentuadamente, o que, geralmente, ocorre dentro de 2 ou 3 dias após uma chuva ou irrigação no solo permeável de estrutura e textura uniforme” (VIEHMEYER; HENDRICKSON, 1949, tradução nossa).

Esse conceito clássico da capacidade de campo refere-se à máxima quantidade de água que um solo consegue reter após a saturação e a drenagem do excesso de água, atingindo um equilíbrio com o mínimo de lixiviação. Mas, colocar isso em prática é muito complexo, trabalhoso e demorado, além de ser um conceito arbitrário. No entanto, tensões próximas de 6 kPa foram encontradas utilizando-se o ponto de inflexão para calcular a capacidade de campo para Latossolos (MELLO et al., 2002).

As câmaras de pressão com placa porosa (RICHARDS, 1949) e os funis de placa porosa (HAINES, 1930) são equipamentos utilizados na determinação da curva de retenção de água no solo. A câmara de pressão de Richards é o método mais tradicional e considerado padrão, porém, tem a desvantagem do elevado custo de aquisição (LUCAS et al., 2011, MELO FILHO; SACRAMENTO; CONCEIÇÃO, 2015). A mesa de tensão também é empregada para a determinação da capacidade de campo, exclusivamente para baixas tensões. Esse equipamento tem como vantagens a facilidade na montagem, a flexibilidade na construção, a fácil utilização e o baixo custo, como, por exemplo, as colunas de areia (REINERT; REICHERT, 2006).

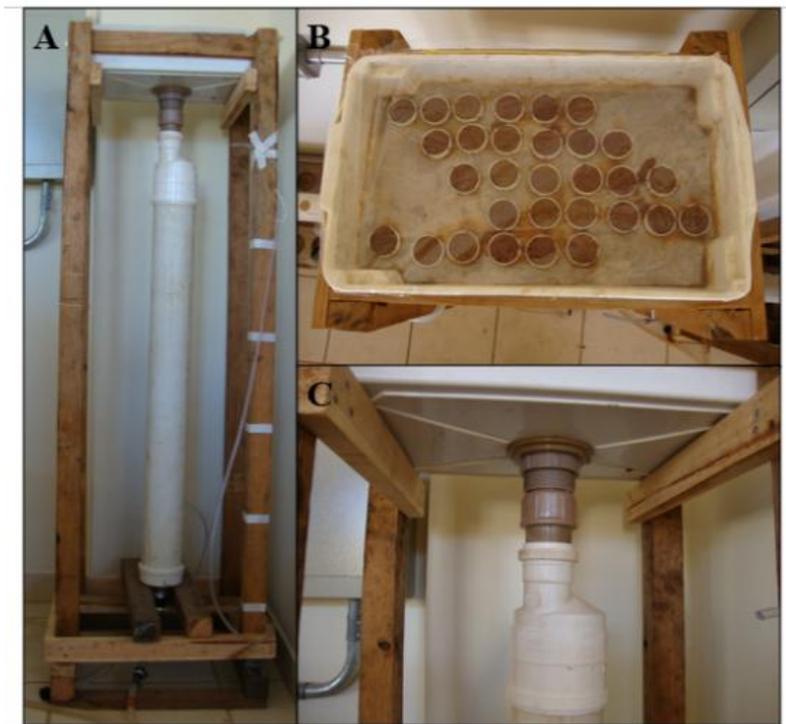
Este trabalho foi realizado com o objetivo de construir uma mesa de tensão de baixo custo e fácil montagem para determinar a tensão de retenção de água no solo. Posteriormente, buscou-se validar a mesa de tensão construída, comparando-a com a câmara de pressão de Richards, por meio de modelos matemáticos lineares utilizando-se amostras de solo de diferentes sistemas de cultivo.

2 - MATERIAL E MÉTODOS

2.1 - Construção da mesa de tensão

Uma estrutura de madeira com altura de 150 cm foi construída para apoiar a mesa de tensão, sendo o comprimento e a largura baseados nas dimensões da bandeja utilizada como recipiente das amostras de solo (FIG. 1a). Utilizou-se uma bandeja de plástico com 48 cm de comprimento, 28 cm de largura e 8,5 cm de altura, entretanto, outras bandejas e dimensões podem ser utilizadas, desde que o recipiente seja rígido e impermeável (FIG. 1b). A bandeja foi encaixada na parte superior dessa estrutura e conectada a tubulações de policloreto de vinila (PVC). No meio da bandeja foi feito um furo para inserir um “adaptador para caixa d’água de 50 mm” e, por meio de conexões, uma “redução excêntrica 100 x 50 mm” foi encaixada e conectada a um tubo de 100 mm de diâmetro (FIG. 1c).

Figura 1 - Mesa de tensão construída em colunas de PVC com areia. A) Vista geral do equipamento; B) bandeja com amostras de solo; C) detalhes das conexões de PVC.



Na parte inferior da coluna de PVC foi acoplado um tampão e, no meio dele, um “adaptador para caixa d’água de 20 mm”; posteriormente, um “adaptador de mangueira 1/2” foi colocado através de conexões para o abastecimento de água. Na parte inferior também foi acoplado um microtubo flexível para saída de água com comprimento que atingisse a altura da bandeja. A coluna de PVC deve ter um comprimento total de 120 cm e seu interior preenchido com brita no terço inferior, areia grossa no terço médio e areia média no terço superior. O tamanho das partículas no interior da coluna aumenta de baixo para cima. Na bandeja foi colocada uma camada de 2 cm de areia fina e, no topo, um papel filtro.

2.2 - Funcionamento da mesa de tensão

Uma mangueira foi conectada no abastecimento de água, na parte inferior da coluna, com o objetivo de encher a mesa de tensão de baixo para cima e de forma lenta, para evitar bolhas de ar dentro da coluna. O abastecimento de água foi desligado quando a água encobriu a areia da bandeja e drenada completamente para assentamento das partículas dentro da coluna.

A partir da altura média da amostra de solo posicionada na bandeja, a estrutura de madeira foi graduada de 20 em 20 cm, até totalizar 120 cm; cada 20 cm de comprimento equivale a 2 kPa de tensão. O funcionamento da mesa de tensão consiste na diferença de nível da amostra e o posicionamento do tubo flexível de saída de água, proporcionando uma sucção da água. Esse funcionamento obedeceu ao mesmo princípio proposto por Lima e Silva (2008), com coluna de água realizando a sucção até atingir o equilíbrio hidrostático.

As amostras de solo saturadas foram colocadas na mesa de tensão, garantindo o contato da amostra com a superfície do papel filtro. A bandeja foi coberta com um filme plástico para evitar a perda de água por evaporação. As tensões aplicadas variam de 0 a 12 kPa e consistem em determinar as umidades gravimétricas do solo em suas respectivas tensões de retenção de água. O equilíbrio hidrostático para cada tensão foi alcançado quando a água para de gotejar no tubo flexível de saída.

2.3 - Descrição dos locais de estudo

O estudo foi realizado em diferentes locais na região de Lagoa da Prata, estado de Minas Gerais, Brasil (20° 01' 22" S, 45° 32' 38" O, altitude de 650 m).

Os solos e seus respectivos sistemas de cultivo na área de estudo foram Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2006) sob pastejo extensivo, cuja área era cultivada com

pastagem há cerca de 30 anos, sem realizar preparo do solo, e o manejo feito de forma contínua, sem o controle da carga animal que suporta, realizado com animais leves (recria). Nessa área não era realizada adubação desde sua implantação, mas, apesar de ter um manejo inadequado, ela está com poucos sinais de degradação. Os demais solos foram Latossolos Vermelhos distroféricos (EMBRAPA, 2006) nos seguintes sistemas de cultivo: cultivo de milho, cultivo de tifton (*Cynodon* spp.), cultivo de cana-de-açúcar, pastejo rotacionado com *Urochloa brizantha* (Syn. *Brachiaria brizantha*) e mata natural.

A área do cultivo de milho estava infestada por *Urochloa* spp. (Syn. *Brachiaria* spp.) e, no momento da colheita, que foi realizada mecanicamente, se formou uma cobertura morta muito espessa. Historicamente, nessa área cultivaram-se cana-de-açúcar e arroz, durante 10 anos, e, no último ano, cultivou-se o milho em sistema convencional. O cultivo de tifton foi realizado sob pivô central e utilizado maquinário pesado para a produção de feno. Esse manejo foi realizado durante 14 anos e nunca passou por avaliações físicas do solo e práticas para descompactação do solo. A área de pastagem foi formada há 19 anos e, nos últimos três anos, adotou-se o sistema de pastejo rotacionado. O pasto foi formado com *Urochloa brizantha* cv. MG 5 e adubada anualmente para a manutenção da fertilidade.

Na área do cultivo da cana-de-açúcar foram feitas três colheitas de forma manual sem realizar a queima da palhada. O material colhido foi retirado com trator de pneus de pequeno porte e carreta de duas rodas. Este tipo de manejo ajuda a aumentar a matéria orgânica do solo e o protege contra a erosão hídrica. Nessa área, o milho cultivado por três anos foi sucedido pela cana-de-açúcar. A mata foi o tratamento controle, sistema natural sem intervenção antrópica, caracterizada como mata de sucupira típica de transição dos biomas de Cerrado para floresta semidecidual da Mata Atlântica.

2.4 - Coletas e análises dos solos

As amostras de solo com estruturas deformadas e indeformadas foram coletadas em cada sistema de cultivo na camada de 0 a 20 cm. As amostras indeformadas foram coletadas utilizando-se o amostrador de Uhland. Para cada sistema de cultivo foram coletadas 10 amostras de solos identificadas e levadas para o laboratório. As análises granulométricas pelo método da pipeta (DAY, 1965; EMBRAPA, 1997), as densidades do solo (DS) pelo método dos anéis volumétricos (BLAKE; HARTGE, 1986) e os teores de matéria orgânica (MO) (RAIJ; QUAGGIO, 1983) foram determinadas no laboratório. As médias da DS e da MO foram comparadas entre os sistemas de cultivo pelo teste T de student, a 5%.

As amostras deformadas foram peneiradas em malha de 2 mm e acondicionadas dentro de anéis identificados. Os anéis foram feitos de tubos de PVC com diâmetro de 32 mm e 20 mm de altura. Os solos foram saturados em água destilada por 72 horas e, posteriormente, colocados na mesa de tensão (Figura 1b).

2.5 - Validação da mesa de tensão

A mesa de tensão foi comparada com a câmara de pressão de Richards (RICHARDS, 1949) para sua validação. As amostras de solo foram submetidas às tensões de 2, 4, 6, 8, 10 e 12 kPa, com dez repetições para cada sistema de cultivo, totalizando 60 parcelas para cada equipamento. As amostras na mesa de tensão foram conduzidas ao mesmo tempo, mas, para isso, foi necessária a construção de duas mesas, devido ao grande número de parcelas. A divisão das amostras nas duas mesas foi equivalente, contendo todos os sistemas e cinco repetições cada.

Os resultados dos equipamentos foram comparados seguindo o procedimento descrito por Snedecor e Cochran (1989), plotando-se as curvas de retenção de água. O modelo $y = a x^b$ foi ajustado às curvas de retenção de cada tratamento. Para compararem-se as curvas, procedeu-se à linearização [$\ln(y) = \ln(a) + b \ln(x)$], comparando-se os coeficientes linear e angular entre os tratamentos. Primeiramente, as mesas de tensão foram comparadas e sua concordância resultou na união dos resultados. Posteriormente, a mesa de tensão e a câmara de pressão de Richards foram comparadas estatisticamente.

Determinou-se, também, a razão entre os equipamentos nas tensões de 6 e 10 kPa, definindo-se um fator de correção para cada sistema de cultivo. Na câmara de pressão de Richards realizou-se a comparação entre os sistemas de cultivo pelo teste de Tukey.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sistemas de cultivo apresentaram diferentes densidades, texturas e matéria orgânica do solo (TAB. 1). A área sob cultivo de tifton, mesmo com o maior teor de matéria orgânica, promotor da resistência do solo à compactação, apresentou maior densidade do solo, seguida pelo pastejo rotacionado. Este fato pode ser explicado pelo intenso tráfego de máquinas em área irrigada sem o controle da carga aplicada no solo e manejo inadequado da água. O tráfego das máquinas agrícolas proporciona aumento na densidade do solo (ROQUE et al., 2010) e os solos úmidos e de alto teor de argila são mais vulneráveis ao impacto dessa compactação (STOESSEL et al., 2018).

Tabela 1 - Densidade (DS), textura e matéria orgânica (MO) do solo dos diferentes sistemas de cultivo.

Sistema de cultivo	DS	Areia	Silte	Argila	MO
	g cm ⁻³	-----	g kg ⁻¹ -----		Dag kg ⁻¹
Milho	1,16 c	13	29	59	19 b
Tifton	1,43 a	4	37	59	32 a
Pastejo rotacionado	1,32 b	4	42	54	24 b
Pastejo extensivo	1,11 c	11	25	64	16 b
Cana-de-açúcar	1,05 d	13	27	60	17 b
Mata (controle)	1,17 c	10	28	62	20 b

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não são diferentes entre si, pelo teste T de student, a 5%.

O excesso de carga animal para o pastejo rotacionado, também sem a preocupação da pressão aplicada ao solo, pode ocasionar maior densidade do solo. O pisoteio animal e o tráfego de máquinas agrícolas em faixa inadequada de umidade do solo são as principais causas da compactação do solo (PIRES et al., 2012; NEIVA JÚNIOR et al., 2015). Alterações na densidade do solo afetam o movimento da água, dos nutrientes e o crescimento de raízes e, conseqüentemente, influenciam o desenvolvimento das pastagens (SOUZA et al., 2013).

As mesas de tensão foram comparadas com os modelos matemáticos lineares (SNEDECOR; COCHRAN, 1989) ajustados para as umidades do solo e as tensões de retenção de água (TAB. 2). Esses modelos não apresentaram diferença estatística entre as duas mesas de tensão, independente do sistema de cultivo. Assim, as duas mesas de tensão foram utilizadas na validação do equipamento, pois mostram similaridade dos resultados.

Os resultados das duas mesas de tensão foram combinados e novas equações foram ajustadas para cada sistema de cultivo. A partir dessas novas equações, a mesa de tensão foi comparada à câmara de pressão de Richards por meio de modelos lineares (Snedecor e Cochran, 1989) (TAB. 3). Os modelos lineares gerados da mesa de tensão apresentaram diferença estatística dos modelos gerados pela câmara de pressão de Richards. A câmara de pressão de Richards é considerada precisa e comercialmente utilizada, pois é constituída de placas porosas com granulometria uniforme e com mínima deformabilidade, e por ter uma aplicação de pressão constante.

Tabela 2 - Modelos lineares ajustados para os diferentes sistemas de cultivo nas diferentes tensões de retenção de água no solo, comparando-se duas mesas de tensão igualmente construídas.

Sistemas de cultivo	Equação ajustada		Significância
	Mesa de tensão 1	Mesa de tensão 2	
Milho	$y = -0,4575x + 29,571$ $R^2 = 0,8021$	$y = -0,4884x + 31,992$ $R^2 = 0,7748$	NS
Tifton	$y = -0,501x + 30,156$ $R^2 = 0,6102$	$y = -0,5158x + 32,129$ $R^2 = 0,7102$	NS
Pastejo rotacionado	$y = -0,6236x + 28,238$ $R^2 = 0,7187$	$y = -0,651x + 27,047$ $R^2 = 0,7682$	NS
Pastejo extensivo	$y = -0,4051x + 22,985$ $R^2 = 0,795$	$y = -0,4325x + 21,956$ $R^2 = 0,895$	NS
Cana-de-açúcar	$y = -0,4051x + 22,985$ $R^2 = 0,795$	$y = -0,4442x + 25,501$ $R^2 = 0,7578$	NS
Mata (controle)	$y = -0,371x + 22,513$ $R^2 = 0,7826$	$y = -0,3516x + 22,724$ $R^2 = 0,7913$	NS

^{NS} não significativo, pelo método de Snedecor e Cochran (1989).

Tabela 3. Modelos lineares ajustados para os diferentes sistemas de cultivo nas diferentes tensões de retenção de água no solo, comparando-se a mesa de tensão construída com a câmara de pressão de Richards.

Sistemas	Equação ajustada		Significância
	Mesa de tensão	Câmara de pressão	
Milho	$y = -0,46x + 27,82$ $R^2 = 0,77$	$y = -0,93x + 31,99$ $R^2 = 0,77$	**
Tifton	$y = -0,52x + 28,61$ $R^2 = 0,63$	$y = -1,11x + 38,82$ $R^2 = 0,82$	**
Patejo rotacionado	$y = -0,54x + 29,68$ $R^2 = 0,69$	$y = -0,99x + 35,04$ $R^2 = 0,76$	**
Pastejo extensivo	$y = -0,46x + 25,61$ $R^2 = 0,76$	$y = -0,94x + 33,75$ $R^2 = 0,85$	**
Cana-de-açúcar	$y = -0,41x + 23,50$ $R^2 = 0,6942$	$y = -0,95x + 38,80$ $R^2 = 0,75$	**
Mata (controle)	$y = -0,39x + 23,99$ $R^2 = 0,7675$	$y = -0,73x + 28,11$ $R^2 = 0,82$	**

** significativo, a 5%, pelo método de Snedecor e Cochran (1989).

Os sistemas de cultivos foram comparados dois a dois por meio dos modelos lineares (SNEDECOR; COCHRAN, 1989) para cada equipamento, mesa de tensão e câmara de pressão de Richards (TAB. 4). Observa-se que as mesmas diferenças estatísticas entre os sistemas foram encontradas nos dois equipamentos, sendo elas cultivo de tifton *versus* pastejo rotacionado e pastejo extensivo *versus* cultivo de cana-de-açúcar, que não apresentaram diferenças estatísticas entre si, e os demais foram todos estatisticamente diferentes. Isto demonstra que, apesar de os dois equipamentos apresentarem resultados diferentes, eles exibem uma mesma tendência.

Tabela 4 - Significância entre os modelos ajustados para os diferentes sistemas de cultivo na mesa de tensão e na câmara de pressão de Richards.

Sistemas de cultivo	Significância	
	Mesa de tensão	Câmara de pressão
Milho x tifton	**	**
Milho x p. rotacionado	**	**
Milho x p. extensivo	**	**
Milho x cana-de-açúcar	**	**
Milho x mata	**	**
Tifton x p. rotacionado	NS	NS
Tifton x p. extensivo	**	**
Tifton x cana-de-açúcar	**	**
Tifton x mata	**	**
P. rotacionado x p. extensivo	**	**
P. rotacionado x cana-de-açúcar	**	**
P. rotacionado x mata	**	**
P. extensivo x cana-de-açúcar	NS	NS
P. extensivo x mata	**	**
Cana-de-açúcar x mata	**	**

^{NS} não significativo, ^{**} significativo a 5 %, pelo método de Snedecor e Cochran (1989) e (P) pastejo.

A matéria orgânica e a densidade do solo são fatores que afetam a retenção de água no solo e estas são importantes propriedades hidráulicas na disponibilidade de água (YANG et al., 2018). A similaridade dos sistemas de cultivo pode ser explicada pelos valores

próximos de densidade do solo e matéria orgânica para os sistemas estatisticamente iguais, que conferem aos Latossolos características semelhantes de retenção de água do solo.

Os valores da mesa de tensão foram diferentes da câmara de pressão de Richards, demonstrando a necessidade de uma calibração dos valores de umidade obtidos para o equipamento construído. Assim, os valores médios das umidades do solo nas tensões de retenção de água no solo de 6 e 10 kPa da câmara de pressão foram subtraídos pelos valores médios da mesa de tensão, obtendo-se um fator de correção (TAB. 5).

Tabela 5 - Valores das umidades médias do solo nas tensões de retenção de água de 6 e 10 kPa, para a mesa de tensão e a câmara de pressão de Richards, e os fatores de correção para as umidades.

Sistemas	Umidade do solo (%)				Fator de correção	
	Mesa de tensão		Câmara de pressão		6 kPa	10 kPa
	6 kPa	10 kPa	6 kPa	10 kPa		
Milho	39,74	36,75	25,75 c	24,36 c	1,54	1,51
Tifton	39,46	37,66	29,60 a	26,40 a	1,33	1,45
Pastejo rotacionado	39,63	38,94	29,10 a	26,47 a	1,36	1,47
Pastejo extensivo	38,58	35,33	27,32 b	26,00 b	1,41	1,36
Cana-de-açúcar	37,22	35,27	28,18 b	26,14 b	1,32	1,31
Mata (controle)	40,29	37,22	28,20 b	25,89 c	1,43	1,44
Média					1,41	1,42

Médias seguidas de mesma letra na coluna não são diferentes entre si, estatisticamente, pelo teste Tukey, a 5%.

Na câmara de pressão de Richards observa-se que as umidades foram maiores para os manejos tifton e pastejo rotacionado. Estes sistemas de cultivo também apresentam maiores valores de densidade do solo que, por consequência, aproximam as partículas do solo reduzindo a percolação da água, conservando a água mais tempo no sistema solo. Outro fato para a maior retenção de água para estes solos é que eles apresentam maiores conteúdos de matéria orgânica, que têm grande capacidade de reter água (ROCHA et. al, 2002).

Os fatores de correção se apresentaram de forma variável para cada sistema; como não se trata de apenas um solo e um único sistema, a relação não foi constante. A variabilidade dos fatores de correção ocorre devido à condutividade hidráulica dentro da mesa de tensão, pois a areia, mesmo peneirada, não apresenta uma regularidade granulométrica, tal qual a placa porosa da câmara de pressão de Richards. Assim, variam o fluxo de água e,

possivelmente, sua retenção em função da pressão aplicada. O fator de correção foi necessário para utilizar o equipamento com precisão.

4 - CONCLUSÃO

A mesa de tensão foi construída com materiais que sobram de construção civil, não havendo custo econômico, mas, com a compra de materiais novos, os gastos seriam em torno de 200 reais. A mesa de tensão construída em colunas de PVC com areia foi de baixo custo, de fácil montagem e manuseio, e viável para determinar a retenção de água no solo em baixas tensões.

5 - AGRADECIMENTO

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

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLAKE, G.R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: Klute A, editor. **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. Part 1, p.363-375.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: Black CA, Evans DD, Ensminger LE, White JL, Clark FE, editors. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy; 1965. p. 545-567.

DE JONG VAN LIER, Q. Field capacity, a valid upper limit of crop available water? **Agricultural Water Management**, v. 193, p. 214–220, nov. 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2a ed. Brasília, DF: Centro Nacional de Pesquisas do Solo; 1997. 212 p.

FILGUEIRA, R. et al. Modelos de curva de retenção de água no solo. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, Irriga & Inovagri, v. 1, n. 1, p. 115-120, 2016.

GAO, Z. et al. Root-induced changes to soil water retention in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau, China. **Journal of Soils and Sediments**, v. 18, n. 3, p. 791-803, mar. 2018.

HAINES, W. B. Studies in the physical properties of soil. V. The hysteresis effect in capillary properties, and the modes of moisture distribution associated therewith. **The Journal of Agricultural Science**, v. 20, n. 1, p. 97-116, jan. 1930.

- LIMA, H. V.; SILVA, A. P. Mesa de tensão com areia: procedimentos para montagem e validação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32 n. 5, p. 2209-2214 set./out. 2008.
- LUCAS, J. F. R. et al. Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 1957-1973, nov./dez. 2011.
- MELLO, C. R. et al Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.26, n.4, p.836-841, jul./ago., 2002.
- MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; CONCEIÇÃO, B. P. S. Curva de retenção de água elaborada pelo método do psicrômetro para uso na determinação do índice "S" de qualidade física do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 5, p. 959-966, set./out. 2015.
- NEIVA JÚNIOR, E. et al. Compressibility and penetrability of latossolo Vermelho-amarelo distrófico (oxisol) under varied Management systems and land uses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 86-93, jan./fev. 2015.
- PIRES, B. S. et al. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-amarelo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 635-642, mar./abr. 2012.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, nov./dez. 2006.
- RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas; 1983. (Boletim técnico, 81).
- RICHARDS. L. A. Methods of measuring soil moisture tension. **Soil Science**, v. 68, n. 1, p. 95-112, jul. 1949.
- ROQUE, A. A. O. et al. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 7, p. 744-750, jul. 2010.
- ROCHA, W. W. et al. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 297-303, abr./jun. 2002.
- SHWETHA, P.; VARIJA, K. Soil water retention curve from saturated hydraulic conductivity for sandy loam and loamy sand textured soils. **Aquatic Procedia**, v. 4, n. 1, p. 1142 – 1149, 2015.
- SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8th ed. Ames: Iowa State University Press; 1989.
- SOUZA, I. A. at al. Physical properties of a Red-Yellow Latosol and productivity of a signalgrass pasture fertilized with increasing nitrogen doses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1549-1556, nov./dez. 2013.

STOESSEL, F. et al. Assessing the environmental impacts of soil compaction in Life Cycle Assessment. **Science of The Total Environment**, v. 630, n. 1, p. 913-921, jul. 2018.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. **Soil Science**, v.68, n. 1, p.75-94, jul. 1949.

YANG, F. et al. Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 519: 3086-3093, nov. 2014.

Artigo II

COMPRESSIBILIDADE, VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO BÁSICA E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE UM LATOSSOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO**RESUMO**

Nas áreas cultivadas, a compactação do solo é um dos principais fatores que favorecem a degradação do ambiente, além de provocar alterações na estrutura física do solo e afetar negativamente a produção da cultura implantada. Assim, torna-se necessário monitorar e avaliar os atributos físicos do solo. O objetivo, neste trabalho, foi avaliar as alterações dos atributos físicos do solo por meio de técnicas da mecânica e física de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes manejos de cultivo. As amostras de solo foram coletadas na cidade Passos, MG, onde estão implantados os diferentes sistemas, mata natural, pastagem irrigada, pastagem não irrigada, plantio direto e convencional com milho. A qualidade física do solo foi avaliada por meio do ensaio de compressibilidade, velocidade de infiltração básica do solo (VIB) e resistência do solo à penetração. O solo sob pastagem, sem e com irrigação, apresentou maiores valores de pressão de pré-consolidação, quando comparado com o solo sob mata, sob plantio direto e sob plantio convencional. O pisoteio animal foi a causa para esta variação, pois a pressão exercida pelo rebanho bovino sobre o solo pode levá-lo à deformação que, se for permanente, causa a compactação. O sistema de plantio direto tinha pouco tempo de estabelecimento e, por isso, apresentou reflexo inicial do preparo do solo, com estrutura mais solta. Para a VIB não se observaram diferenças significativas entre os sistemas e indicaram alta infiltração de água. O solo sob pastagem irrigada apresentou maiores valores de resistência à penetração, em comparação com o solo sob pastejo não irrigado. Os solos dos manejos de cultivo estudados não estavam compactados de acordo com os atributos físicos avaliados, porém, constataram-se alterações nos atributos, em comparação com o solo sob a mata natural. O monitoramento dos manejos é necessário para evitar a compactação do solo futuramente.

Palavras-chave: Compactação do solo, estrutura do solo, sistema de plantio direto, pisoteio animal.

COMPRESSIBILITY, STEADY STATE INFILTRATION RATE AND PENETRATION RESISTANCE OF OXISOL UNDER DIFFERENT CROP MANAGEMENT

ABSTRACT

In cultivated areas, soil compaction is one of the main factors that favor environmental degradation, besides causing changes in the physical structure of the soil and negatively affecting the production of the implanted crop. Thus, it is necessary to monitor and evaluate the physical attributes of the soil. The objective of this study was to evaluate the changes in soil physical attributes through mechanical and physical techniques of a oxisol under different tillage management. Soil samples were collected in the city Passos, MG, where the different systems, natural forest, irrigated pasture, non-irrigated pasture, no-tillage and conventional tillage with corn are implemented. The physical quality of the soil was evaluated by the compressibility test, basic soil infiltration velocity (VIB) and soil resistance to penetration. The soil under pasture, without and with irrigation, presented higher values of pre-consolidation pressure when compared to the soil under forest, under no-tillage and under conventional tillage. Animal trampling was the cause of this variation, because the pressure exerted by the cattle herd on the soil can lead to deformation that, if permanent, causes compaction. The no-tillage system had a short time of establishment and, therefore, showed initial reflection of tillage, with looser structure. For VIB no significant differences were observed between the systems and indicated high water infiltration. The soil under irrigated pasture presented higher values of penetration resistance compared to the soil under non-irrigated pasture. The soils of the cultivation management studied were not compacted according to the evaluated physical attributes, however, there were alterations in the attributes compared to the soil under the natural forest. Management monitoring is necessary to prevent soil compaction in the future.

Keywords: Soil compaction, soil structure, no-till system, cattle trampling.

1 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável na agricultura é muito discutido e desejado na atualidade. Porém, a compactação do solo é um obstáculo para que esse objetivo seja alcançado e ela pode ocorrer devido ao manejo inadequado ou naturalmente (MARTINS, 2012). A compactação do solo em áreas cultivadas é um dos principais fatores que favorecem a degradação do solo, além de provocar alterações nos seus atributos físicos e afetar negativamente a produção da cultura implantada.

A compactação é responsável pelo aumento da resistência do solo à penetração, pela redução da porosidade e pela diminuição da permeabilidade, além de interferir na disponibilidade de nutrientes e de água (OLIVEIRA et al., 2010). Os efeitos desse processo refletem na planta, afetando o crescimento radicular, e no solo, aumentando a sua densidade e acarretando maior consumo de combustível pelas máquinas, durante o seu preparo. A compactação manifesta-se no solo com a presença de zonas endurecidas, empoçamento de água, assoreamento dos mananciais de água e erosão hídrica (BEUTLER et al., 2004).

A compactação do solo pode ser analisada por meio da resistência à penetração, sendo determinada com o penetrômetro eletrônico ou manual, sendo comprovada com valores acima de 2 MPa na umidade de capacidade de campo (MEROTTO JR.; MUNDSTOCK, 1999). Alternativas para avaliar a susceptibilidade à compactação de um solo são o ensaio de Proctor Normal (VARGAS, 1997) e a pressão crítica de cisalhamento (ROCHA et al., 2007).

Outro método inovador atualmente muito utilizado nas ciências agrárias é a pressão de pré-consolidação obtida por meio da curva de compressão, que avalia a compactação e também o processo de compressão do solo. A pressão de pré-consolidação divide essa curva em uma região de deformações recuperáveis e outra de deformações não recuperáveis (DIAS JUNIOR et al., 2004). Dessa forma, a pressão de pré-consolidação indica a máxima pressão aplicada ao solo nas atividades anteriores, evidenciando que pressões maiores do que já foram aplicadas devem ser evitadas para não provocar a compactação do solo.

A compactação influencia a redução da condutividade hidráulica de solo saturado, resultado da diminuição dos macroporos. Assim, a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado é também utilizada na determinação quantitativa e qualitativa do movimento de água no solo e no dimensionamento de sistemas de drenagem, relacionando características físicas e hídricas desse solo. O entendimento do fluxo de água é fundamental para a compreensão dos processos de infiltração e escoamento de água no solo, em estudos de erosão

e lixiviação de substâncias químicas e na capacidade de infiltração dos solos (SCHULER et al., 2003).

A infiltração é o processo pelo qual a água adentra no perfil do solo. Inicialmente, essa taxa de infiltração é maior até que o solo fique saturado. A partir da saturação, a taxa se encontra constante, semelhante ao que ocorre em um solo sob condições de chuvas ou irrigação contínua. Esse processo é influenciado por diversos fatores, tais como umidade, porosidade, cobertura vegetal e atividade biológica, dentro outros (SOBRINHO et al., 2003).

O objetivo, neste trabalho, foi avaliar os atributos físicos do solo por meio de técnicas da mecânica e da física de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes manejos de cultivo.

2 - MATERIAL E MÉTODOS

2.1 - Local do estudo

O experimento foi localizado na Fazenda Experimental da Fundação de Ensino Superior de Passos, absorvida pela Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), localizada na cidade Passos, MG (20° 44' 45.2" S, 46° 38' 01.3" O, altitude de 784 m).

2.2 - Descrição dos sistemas de cultivo

Nessa área foram implantados os diferentes sistemas de cultivo, sendo pastagem irrigada, pastagem não irrigada, plantio direto com milho e plantio convencional com milho, utilizando-se a mata natural como tratamento controle. O experimento foi realizado em uma área total de 6 ha, dos quais 2 ha são de pastagem irrigada, 2 ha de pastagem não irrigada, 1 ha de mata natural, 0,5 ha de plantio direto e 0,5 ha em área de plantio convencional. O solo da área de estudo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2006). Na Tabela 1 estão apresentados os resultados das análises granulométricas (textura) do solo estudado, determinada pelo método da pipeta (DAY, 1965; EMBRAPA, 1997).

Tabela 1 - Resultado da análise textural do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico localizado na Fazenda Experimental da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), localizada na cidade Passos, MG.

Sistemas de cultivo	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)
Mata natural (controle)	57,8	16,0	26,2
Pastagem irrigado	57,9	16,0	26,1
Pastagem não irrigado	61,0	21,0	18,0
Plantio direto ¹	58,4	21,0	20,6
Plantio convencional ²	59,1	21,0	19,9

¹ Rotação de cultura: milho e soja; ² Plantio de milho.

A área de mata natural situou-se abaixo da área de pastagem irrigada e serviu como referência para a comparação (controle) dos atributos físicos avaliados. A área de pastagem foi cultivada com *Urochloa brizantha* cv. Vitória, experimentalmente conduzida em duas faixas, sendo 2 ha irrigados por aspersão convencional e 2 ha não irrigados. Cada faixa foi composta por 16 piquetes para a condução de pastejo rotacionado de bovinos com taxa de lotação de 4 UA ha⁻¹.

As áreas de pastagem receberam 250 kg ha⁻¹ de N e as adubações fosfatadas de correção e manutenção de acordo com a necessidade (CANTARUTTI et al., 1999). O manejo dos piquetes foi feito com dois dias de pastejo e 30 de repouso. A irrigação foi controlada pela evapotranspiração potencial, quantificada por meio de um tanque classe A.

As áreas para a condução das lavouras de milho foram adjacentes às áreas de pastagem. Nestas áreas, conduziram-se os sistemas de plantio direto e convencional, este último composto por uma aração e duas gradagens. As correções de acidez do solo e as adubações de plantio e de cobertura para o milho (ALVES et al., 1999) e pastagens (CANTARUTTI et al., 1999) seguiram as recomendações para o estado de Minas Gerais.

A área de plantio direto foi estabelecida há quatro anos. A cobertura vegetal era composta por plantas de *Urochloa ruziziensis*, dessecada com herbicida glyphosate, cortadas e uniformizadas com roçadoras. A semeadura do milho foi realizada com uma adubadora-semeadora específica para este fim. No sistema de plantio direto adotou-se a rotação de culturas que, neste experimento, foi realizada com a soja. A área foi dividida plantando-se metade com milho e a outra metade com soja e, no ano posterior, invertia-se o plantio na área,

garantindo, todo ano, a rotação entre essas duas culturas. No sistema convencional foi cultivado apenas o milho, em todos os anos.

2.3 - Avaliações físicas do solo

A qualidade física do solo foi avaliada por meio do ensaio de compressibilidade, velocidade de infiltração básica do solo (VIB) e resistência do solo à penetração. Além dessas análises, outras foram feitas, como densidade de partícula (DP) pelo método do balão volumétrico (BLAKE; HARTGE, 1986a); teor de matéria orgânica (MO) (RAIJ; QUAGGIO, 1983); umidade em diferentes tensões de retenção de água no solo (RICHARDS, 1949); densidade do solo (DS) pelo método dos anéis volumétricos (BLAKE; HARTGE, 1986b) e volume total de poros pela equação $VTP = [1 - DS/DP]$. As médias da DS, MO, VIB e umidade da capacidade de campo do solo foram comparadas entre os sistemas de cultivo pelo teste T de student, a 5%.

Em cada sistema foram coletadas 15 amostras de solo indeformadas na profundidade de 0,05 m, as quais foram identificadas, embaladas em filme plástico e impermeabilizadas com parafina para a sua preservação até a realização do ensaio em laboratório.

No laboratório, essas amostras, depois de preparadas, foram saturadas em bandeja com água destilada durante 72 horas, com água cobrindo 2/3 da altura do anel. Posteriormente, as amostras foram submetidas à unidade de sucção para o controle da umidade, com uma tensão de retenção de água de 6 kPa, representando a tensão de retenção de água na capacidade de campo. Com o auxílio da câmara de pressão com placa porosa (RICHARDS, 1949), essas amostras de solo também foram estabilizadas nas seguintes tensões de retenção de água: 2, 10, 33 e 1500 kPa.

As amostras estabilizadas nas tensões de retenção de água no solo foram submetidas ao ensaio de compressibilidade. As cargas foram aplicadas em cada amostra, denominada corpo de prova, por meio de ar comprimido em uma célula de compressão, utilizando-se um consolidômetro com interação homem máquina, modelo CNTA-IHM/BR-001/07, da empresa Masquetto Automação e equipamentos. As cargas aplicadas obedeceram à seguinte ordem: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa (SOUZA et al., 2013). Cada pressão foi aplicada até que 90% da deformação máxima fossem alcançados (HOLTZ; KOVACS, 1981, modificado por DIAS JUNIOR, 1994) e, somente então, uma nova pressão foi aplicada.

Após a finalização dos ensaios, as amostras foram pesadas e encaminhadas à estufa, à temperatura de 105 °C, por 24 horas, para a determinação da umidade. As pressões

de pré-consolidação obtidas no ensaio de compressão uniaxial foram plotadas em função das diferentes umidades, para a obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo. As equações matemáticas foram ajustadas utilizando-se o modelo proposto por Dias Junior (1994) e as comparações das regressões foram feitas pelos procedimentos descritos por Snedecor e Cochran (1989).

O ensaio para quantificar a VIB foi conduzido segundo Bernardo et al. (2006) e consiste na avaliação da infiltração de água no solo com o uso de dois anéis concêntricos, chamados de anéis infiltrômetros. O valor da VIB no solo é a infiltração de água medida por um determinado tempo, sendo adotado o valor que apresentar três leituras iguais e consecutivas. Para cada sistema foram feitas três repetições e, com base nestas análises, foram estimados os valores da VIB, por meio da condutividade hidráulica do solo saturado.

A resistência do solo à penetração foi determinada em amostras indeformadas do solo, coletadas com o auxílio de uma amostrador do tipo Uhland, em anéis de volume conhecido. No laboratório, as amostras foram trabalhadas para que seu volume coincidissem com o volume do anel, facilitando, assim, o cálculo de densidade do solo e o seu manuseio. Nas áreas de estudo com pastagem irrigada e não irrigada coletaram-se 15 anéis na profundidade de 0,05 m.

Depois de preparadas, as amostras foram saturadas com água destilada, por 72 horas. Os ensaios de resistência à penetração tiveram início após a saturação das amostras e consistiram em medir a resistência do solo dentro do anel usando o penetrômetro digital de bancada e pesando-se as amostras logo em seguida. Esse procedimento foi repetido até que o solo atingisse uma umidade muito baixa que não permitisse mais a leitura da resistência à penetração, sendo, então, as amostras levadas à estufa, a 105 °C, por 24 horas, para secagem.

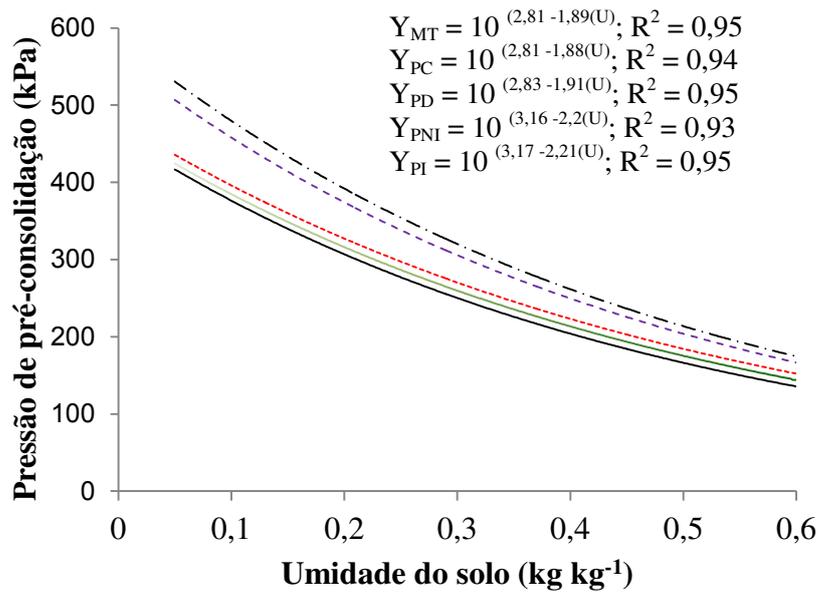
Uma vez que os valores das massas dos solos úmidos e secos já tivessem sido determinados, pode-se calcular as umidades correspondentes aos valores das determinações das resistências à penetração. Os valores máximos de resistência do solo à penetração foram obtidos por meio da equação de resistência à penetração *versus* umidades. As equações foram comparadas estatisticamente pelo teste de Snedecor e Cochran (1989).

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos de sustentabilidade estrutural foram obtidos em função da pressão de pré-consolidação, a qual indicou a máxima pressão aplicada ao solo nas atividades anteriores dos diferentes sistemas de cultivo. A pressão de pré-consolidação também indicou a suscetibilidade do solo à compactação, ou seja, a pressão máxima que o solo suporta sem que

ocasiona deformação plástica (DIAS JÚNIOR, 1994). A pressão de pré-consolidação variou de acordo com a umidade do solo e com o sistema de cultivo (FIG. 1).

Figura 1 - Modelagem da pressão de pré-consolidação, em função da umidade para os diferentes sistemas de cultivo: mata natural - controle (Y_{MT}), plantio direto com milho e soja (Y_{PD}), plantio convencional com milho (Y_{PC}), pastagem não irrigada (Y_{PNI}) e pastagem irrigada (Y_{PI}).



Por meio do teste de identidade de modelos entre as curvas de pressão de pré-consolidação (SNEDECOR; COCHRAN, 1989) verificou-se a homogeneidade entre os sistemas de cultivo (TAB. 2) e observou-se que os modelos gerados para mata (controle), plantio direto e plantio convencional não apresentaram diferença significativa. A pastagem irrigada e a não irrigada apresentaram modelos semelhantes, porém, diferentes dos modelos dos demais sistemas de cultivo.

Tabela 2 - Teste de significância, de acordo com Snedecor e Cochran (1989), entre as curvas de pressão de pré-consolidação de um Latossolo Vermelho-Amarelo nos diferentes sistemas de cultivo.

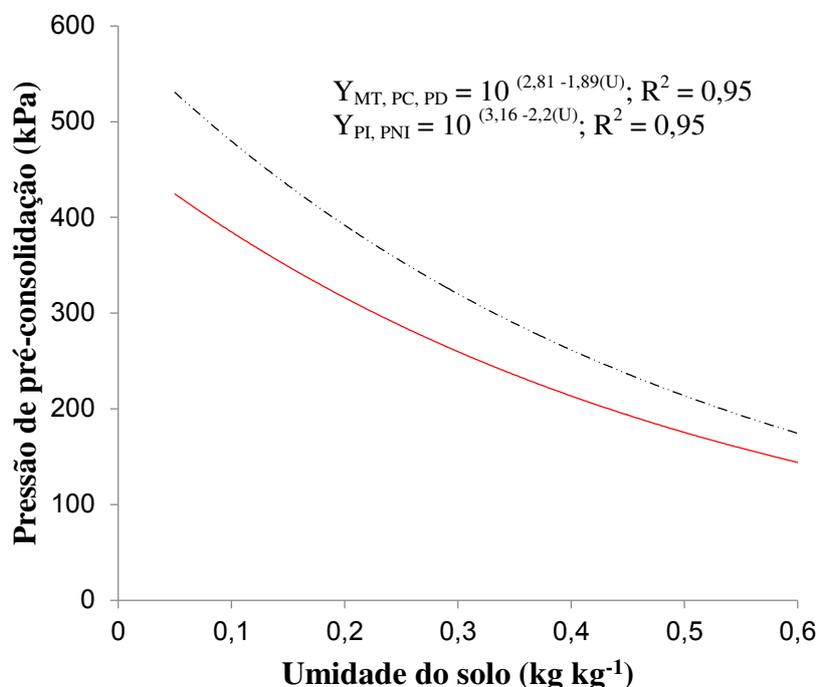
Sistemas de cultivo	F	
	Coeficiente angular, b	Coeficiente linear, a
Mata vs pastagem irrigada	ns	**
Mata vs pastagem não irrigada	ns	**
Mata vs plantio direto	ns	ns
Mata vs plantio convencional	ns	ns
Plantio direto vs plantio convencional	ns	ns
Pastagem irrigada vs pastagem não irrigada	ns	ns
Pastagem irrigada vs plantio direto	ns	**
Pastagem irrigada vs plantio convencional	ns	**
Pastagem não irrigada vs plantio direto	**	ns
Pastagem não irrigada vs plantio convencional	**	ns

F: testa a homogeneidade dos dados; b: coeficiente angular da regressão linearizada; a: intercepto da regressão linearizada; ns: não significativo (homogêneo); ** significativo (não homogêneo), a 5% de probabilidade.

Uma nova modelagem matemática foi feita para ajustar os sistemas de cultivos que apresentaram comportamentos semelhantes, de acordo com modelagem da Pressão de pré-consolidação (FIG. 2). Assim, a mata natural, o plantio convencional e o plantio direto foram representados por uma única modelagem, e as pastagens irrigadas e não irrigadas foram representadas por outra curva.

Os solos sob pastagem apresentaram maiores valores de pressão de pré-consolidação, quando comparados com o solo sob mata, sob plantio direto e sob plantio convencional, o que pode ser observado pela posição das curvas (FIG. 2). O pisoteio animal foi a causa principal para esta variação, pois a pressão exercida pelo rebanho bovino sobre o solo pode levá-lo à deformação e que, se for permanente, causa a sua compactação (ALBUQUERQUE; SANGOI; ENDER, 2001).

Figura 2 – Junção das modelagens da pressão de pré-consolidação, em função da umidade para os sistemas de cultivo com comportamento semelhante: mata natural - controle (Y_{MT}), plantio direto com milho e soja (Y_{PD}), plantio convencional com milho (Y_{PC}), pastagem não irrigada (Y_{PNI}) e pastagem irrigada (Y_{PI}).



As áreas de pastagem irrigada e não irrigada não tiveram diferença entre elas, devido à regularidade do período chuvoso, tendo a área não irrigada permanecido por um tempo com a umidade no solo semelhante à da área irrigada, concordando com Pires et al. (2012). Considerando que a pressão aplicada foi a mesma, e o teor de matéria orgânica muito semelhante, o solo apresentou comportamento compressivo semelhante. Somado a isto, pode-se ressaltar que as adubações realizadas puderam proporcionar efeito no bom desenvolvimento da cultura.

Os solos sob mata natural, sistema de plantio direto e plantio convencional apresentaram menores valores para pressão de pré-consolidação, em comparação com os das áreas de pastagem. A mata, por não ser submetida a nenhum manejo que altere a estrutura do solo e apresentar maior teor de matéria orgânica, apresentou uma estrutura mais solta e leve. O plantio convencional, por estar com a estrutura do solo mais solta, ocasionada pelo seu preparo, aração e gradagem.

O sistema de plantio direto teve pouco tempo de estabelecimento e, por isso, apresentou reflexo inicial do preparo do solo, com estrutura mais solta pelos processos de aração e gradagem, mesmo com o tráfego de máquinas para colheita e plantio do milho. Áreas

de plantio direto com mais tempo de estabelecimento apresentaram maior pressão de pré-consolidação, pois a camada superficial estava mais consolidada (PIRES et al., 2012).

Na Tabela 3 apresentam-se os valores de pressão de pré-consolidação na umidade referente à capacidade de campo. Para mata, plantio convencional e plantio direto, os valores de pressão de pré-consolidação foram inferiores em relação as pastagens, menores que 202 kPa,. Nas áreas de pastagem, com e sem irrigação, a pressão de pré-consolidação foi maior que 330 kPa, indicando alta pressão aplicada ao solo no passado.

Tabela 3 - Valores de pressão de pré-consolidação na umidade referente à capacidade de campo e ao volume total de poros para os manejos de cultivo.

Sistemas de cultivo	Pressão de pré-consolidação (kPa) na capacidade de campo	Volume total de poros (cm ³ cm ⁻³)
Mata natural (controle)	190 b	0,45
Plantio direto	199 b	0,33
Plantio convencional	201 b	0,26
Pastagem irrigada	349 a	0,20
Pastagem não irrigada	333 a	0,30

Médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem, estatisticamente, entre si, pelo teste de Snedecor e Cochran, a 5% de probabilidade.

O solo sob pastagem irrigada suportou maior carga, em comparação com o solo sob mata, fato que explica o menor valor de volume total de poros (VTP) (TAB. 3), influenciando negativamente a movimentação de água do solo. Os valores de pressão de pré-consolidação revelam a máxima carga que solo pode suportar sem que ocorra a compactação. É importante ressaltar que um bovino adulto pode aplicar até 550 kPa de pressão no solo (CARVALHO et al., 2010), muito superior à máxima pressão que o solo suporta na capacidade de campo. Esta informação para o pastoreio será uma excelente alternativa para auxiliar o manejo desses animais na área, evitando atingir a capacidade de suporte de carga, principalmente na pastagem irrigada que constantemente está com umidade de capacidade de campo.

Os sistemas de cultivo apresentaram VTP superiores a 0,15 cm³ cm⁻³, ou seja, eles não estão compactados. VTP inferiores a 0,15 cm³ cm⁻³, ou 15%, caracterizam compactação do solo (MORAES et al., 2002). Observou-se que a tendência de os valores de

VTP serem inversamente proporcionais aos valores de pressão de pré-consolidação foi mantida, tendo o solo sob mata sido o que apresentou o maior valor de VTP e o solo sob pastagem, o menor. Tal fato evidencia que a pastagem, em comparação com a mata, apresentou os menores valores de VTP, o que indica, também, uma alteração estrutural.

Os valores da velocidade de infiltração básica de água no solo (VIB) obtida pelo método de campo não apresentaram diferenças significativas entre os sistemas de cultivo (TAB. 4). O valor médio da VIB foi de 16 mm h⁻¹, o que, de acordo com Bernardo et al. (2006), indica alta infiltração de água, entre 15 e 30 mm h⁻¹. Esta alta infiltração está associada ao alto teor de areia desses solos. Solos arenosos apresentam porosidade total reduzida, porém, a taxa de infiltração de água é alta, devido à predominância de macroporos (KUNZ; ÁVILA; PETRY, 2014).

Tabela 4 - Valores da velocidade de infiltração básica de água no solo (VIB), densidade do solo (DS), umidade na capacidade de campo (UCC) e teor de matéria orgânica (MO).

Sistemas de cultivo	VIB (mm h ⁻¹)	DS (g cm ⁻³)	UCC (kg kg ⁻¹)	MO (dag kg ⁻¹)
Mata	15,8 a	1,11 c	0,28 a	3,8
Plantio direto	15,9 a	1,25 b	0,28 a	1,9
Plantio convencional	16,1 a	1,18 c	0,25 b	1,4
Pastagem irrigada	15,9 a	1,27 a	0,29 a	1,8
Pastagem não irrigada	15,5 a	1,27 a	0,28 a	1,6

Médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem estatisticamente entre si, pelo teste t de Student, a 5%.

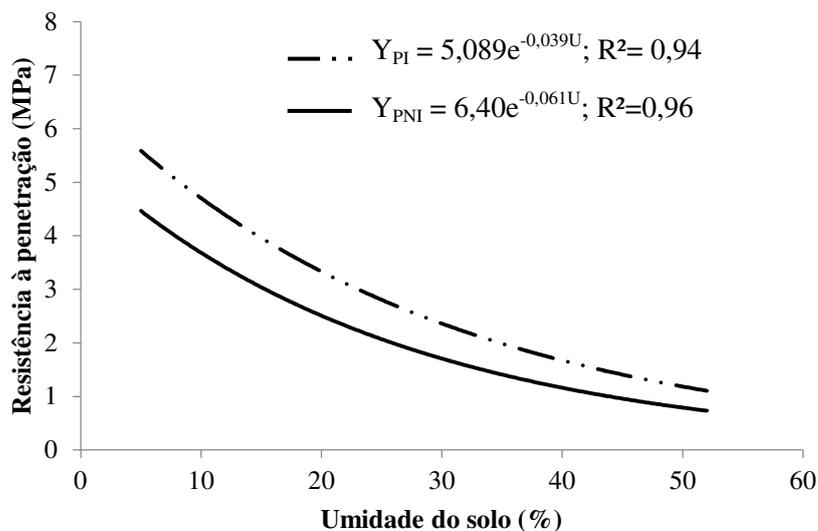
Os solos dos sistemas de cultivo não apresentaram densidades consideradas críticas, ou seja, acima de 1,55 g cm⁻³ (BOWEN, 1981). De forma geral, as pastagens apresentaram maiores valores de densidade de solo em comparação com a mata natural, indicando uma alteração estrutural e confirmando a tendência observada na modelagem da pressão de pré-consolidação (TAB. 4). A conversão da mata nativa em pastagem promoveu perda da qualidade química e física do solo (CARDOSO et al., 2011). A mata natural foi livre de ações antrópicas, o que preserva suas estruturas originais e serve de parâmetro para os demais sistemas de cultivo.

A umidade na capacidade de campo não apresentou diferença significativa para plantio direto, pastagem irrigada e não irrigada e mata. A mata, por apresentar maiores valores de matéria orgânica e, conseqüentemente, maior retenção de água e a pastagem irrigada, por

estar sempre com umidade próxima à da capacidade de campo, possivelmente apresentaram melhor regularidade nos poros e maior retenção de água. O plantio convencional foi o sistema com menor valor de umidade para a capacidade de campo e isto se deve à sua estrutura mais solta, devido às práticas de preparo do solo, uma aração e duas gradagens (TAB. 4).

De acordo com o teste de significância com Snedecor e Cochran (1989), entre as curvas resistências à penetração de um Latossolo Vermelho-Amarelo nos diferentes manejos de irrigação, foram observadas diferenças significativas. O solo sob pastagem irrigada apresentou maiores valores de resistência à penetração em comparação com o solo sob pastejo não irrigado, comprovando que o manejo da irrigação influencia a alteração da estrutura deste solo. As partículas de solo em ambiente mais úmido ficam mais soltas e mais fáceis de reagrupar em função da carga aplicada (FIG. 3).

Figura 3 - Resistência à penetração do solo sob pastagem irrigada (Y_{PI}) e pastagem não irrigada (Y_{PNI}) em diferentes umidades.



Valores de resistência à penetração na capacidade de campo acima de 2 MPa indicam compactação do solo (MEROTTO JR.; MUNDSTOCK, 1999). Os solos dos sistemas de cultivo não apresentaram valores acima do limite 2 MPa, indicando que não há compactação devido a estes manejos (TAB. 5). Porém, observou-se, ainda, a tendência de o solo sob pastejo irrigado ser o manejo com maior valor de resistência mecânica, comprovando que o pisoteio animal, aliado à umidade, proporciona maior alteração à estrutura do solo.

Tabela 5 - Valores médios da resistência do solo à penetração (RP) na capacidade de campo e na umidade média do solo durante o ano conduzido em sequeiro.

Manejo	Umidade na capacidade de campo (%)	RP na umidade da capacidade de campo (MPa)	RP na umidade de 19% (MPa)
Pastagem não irrigada	28	1,16 b	2,00 b
Pastagem irrigada	29	1,64 a	2,42 a

Valores seguidos da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Snedecor e Cochran, a 5%.

Na área de estudo, o solo permanece, em média, com 19% de umidade, quando manejado em sequeiro e, por isso, realizou-se uma simulação da resistência à penetração com o solo nesta umidade. O solo sob pastejo não irrigado apresentou resistência à penetração de 2 MPa, valor este considerado limite crítico para o desenvolvimento de culturas, mostrando que é necessário tomar medidas preventivas para melhorar a estrutura do solo, para que ele não venha se tornar um solo compactado.

A área irrigada, mantendo a umidade a 19%, apresentaria resistência de 2,42 MPa, valor este superior a 2 MPa, fato que, com certeza, comprometeria o desenvolvimento da cultura e a produção animal. Para a penetração das raízes o solo deve apresentar espaços porosos suficientes para o movimento da água e gases, e resistência favorável para penetração. Quando isso não acontece, ocorre a redução da produtividade e a longevidade das pastagens (IMHOFF; SILVA; TORMENA, 2000). No entanto, estando o solo na umidade de 19%, práticas de controle e descompactação seriam necessárias.

4 - CONCLUSÕES

Os solos dos manejos de cultivo estudados não estão compactados de acordo com os atributos físicos avaliados, porém, constataram-se alterações nos atributos em comparação com a mata natural. O monitoramento dos manejos é necessário para evitar compactação do solo futuramente.

5 - AGRADECIMENTO

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

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 717-723, jul./set. 2001.

ALVES, V. M. C. et al. Milho. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARAES, P. T. G.; ALVAREZ V. H., Editores. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5º Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais; 1999. p. 314-316.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de Irrigação. 8 ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 625 p.

BEUTLER, A. N. et al. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 575-580, jun. 2004.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density, In: KLUTE, A., editor. **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; 1986a. Part 1. p. 377-382.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: Klute, A., editor. **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; 1986b. Part 1. p. 363-375.

BOWEN, H. D. Alleviating mechanical impedance. In: ARKIN, G. F.; TAYLOR, H. M. **Modifying the root environment to reduce crop stress**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1981. p. 21-57.

CANTARUTTI, R. B. et al. Pastagem. In: RIBEIRO, A. C., GUIMARAES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H., Editores. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5º Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais; 1999. p. 332-341.

CARDOSO, E. L. et al. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no Pantanal Sul-Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 613-622, mar./abr. 2001.

CARVALHO, R. C. R. et al. Soil shear strength under non-irrigated and irrigated short duration grazing systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p.631-638, maio/jun. 2010.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: Black CA, Evans DD, Ensminger LE, White JL, Clark FE, editors. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy; 1965. p. 545-567.

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under longterm tillage and wheel traffic** [thesis]. East Lansing: Michigan State University; 1994.

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Método alternativo de avaliação da pressão de pré-consolidação por meio de um penetrômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 805-10, set./out. 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2a ed. Brasília, DF: Centro Nacional de Pesquisas do Solo; 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro; 2006.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. Prentice-Hall: Englewood Cliffs; 1981. 747 p.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações de curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1493-500, jul. 2000.

KUNZ, J.; ÁVILA, V. S.; PETRY, M. Distribuição temporal e espacial da umidade do solo em sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 13, n. 5, p. 3963-3976, dez. 2014.

MARTINS, P. C. C. **Capacidade de Suporte de Carga de Diferentes Classes de solos Submetidas a diferentes usos** [tese]. Lavras: Universidade Federal de Lavras; 2012.

MEROTTO JR, A.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 197-202, abr./jun. 1999.

MORAES, M. F. et al. Densidade e porosidade do solo como diagnóstico do estado de degradação de solos sob pastagens na região dos Cerrados. In: **V Simpósio Nacional sobre Recuperação de Áreas Degradadas**, Belo Horizonte. Anais do V Simpósio Nacional sobre Recuperação de Áreas Degradadas: água e biodiversidade. Belo Horizonte: SOBRADE; 2002. p. 256-258.

SCHULER, A. E. et al. Propriedades físicas dos solos na parametrização dos modelos hidrológicos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.8, n.1, p. 61-70, jan./mar. 2003.

OLIVEIRA, V. S. et al. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 9, p. 914-920, set. 2010.

PIRES, B. S. et al. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-amarelo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 635-642, mar./abr. 2012.

RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas; 1983. (Boletim técnico, 81).

RICHARDS, L. A. Methods of measuring soil moisture tension. **Soil Science**, v. 68, n. 1, p. 95-112, jul. 1949.

ROCHA, W. W. et al. Resistência ao cisalhamento do solo do ponto de vista ambiental. In: ABREU, M. H. N., organizador. **Ciências Ambientais: Abordagem multidisciplinar**. Belo Horizonte: Universidade do Estado de Minas Gerais; 2007. p. 87-124.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8th ed. Ames: Iowa State University Press; 1989.

SOBRINHO, T. A. et al. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 191-196, maio/ago. 2003.

SOUZA, I. A. et al. Physical properties of a Red-Yellow Latosol and productivity of a signalgrass pasture fertilized with increasing nitrogen doses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1549-1556, nov./dez. 2013.

VARGAS, M. **Introdução a Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1977. 509p.

Artigo III

O DÉFICIT HÍDRICO POTENCIALIZA OS EFEITOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO NO CRESCIMENTO DO CAFÉ RECÉM-PLANTADO?**RESUMO**

A compactação do solo por meio das atividades agrícolas altera os atributos físicos e, conseqüentemente, afeta o desenvolvimento das plantas. Este estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o crescimento do cafeeiro em diferentes graus de compactação na subsuperfície do solo sob diferentes umidades do solo. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, disposto em esquema fatorial, com quatro repetições. O primeiro fator correspondeu a 50% e 100% da umidade na capacidade de campo do solo (CC) e o segundo, a 60%, 70%, 80% e 90% de graus de compactação do solo (GC). A unidade experimental constituiu-se de uma planta de café cultivada em coluna de policloreto de vinila. O crescimento da parte aérea e do sistema radicular em profundidade foi avaliado aos 180 dias de plantio. As características da parte aérea avaliadas, no geral, diminuíram com o aumento do GC, com relação inversamente proporcional. Para o tratamento com 90% GC observou-se redução no crescimento da parte aérea em comparação ao tratamento 60% GC em 35% e 30%, na condição de 50% e 100% CC, respectivamente. O crescimento da parte aérea e do sistema radicular aumentou, em média, 80% e 137% na CC, respectivamente, em relação a 50% CC. A compactação subsuperficial do solo altera o crescimento em profundidade do sistema radicular, mas não o seu peso total. Como meio de compensar o menor desenvolvimento nas camadas compactadas, as raízes aumentaram seu desenvolvimento nas camadas menos compactadas. A compactação subsuperficial do solo inibe o crescimento inicial do cafeeiro e é agravado quando associada ao déficit hídrico.

Palavras-chave: *Coffea arabica*, irrigação, subsuperfície do solo, perfil do solo, densidade do solo.

DOES THE SOIL WATER DEFICIT POTENTIATE THE EFFECTS OF SOIL COMPACTION ON THE GROWTH OF NEWLY PLANTED COFFEE?

ABSTRACT

Soil compaction by agricultural activities alters the physical attributes and consequently affect the development of plants. The objective of this study was to evaluate coffee tree growth at different soil compaction degrees in the subsurface of the soil under different soil moisture. The experimental design was in randomized blocks, arranged in a factorial scheme, with four replications. The first factor corresponding to 50 and 100% of the humidity in the soil field capacity (FC) and the second one at 60, 70, 80 and 90% soil compaction degrees (CD). The experimental unit consisted of a coffee plant cultivated in polyvinyl chloride column. The growth of the aerial part and the root system in depth were evaluated at 180 days of planting. The aerial part characteristics evaluated, in general, decreased with the increase of the CD, with an inverse proportional relation. For treatment with 90% CD, it was observed a reduction in shoot growth compared to the 60% CD treatment in 35% and 30% in the condition of 50 and 100% FC, respectively. Growth of aerial part and root system increased by an average of 80 and 137% in FC, respectively, in relation to 50% FC. Sub-soil compaction changes the root growth of the root system, but not its total weight. As a means of compensating for the slower development in the compacted layers, the roots increased their development in the less compacted layers. The subsurface compaction of the soil inhibits the initial growth of the coffee tree and is aggravated when associated to the water deficit.

Keywords: *Coffea arabica*, irrigation, soil subsurface, soil profile, soil density.

1 - INTRODUÇÃO

Na agricultura, a degradação do solo devido à compactação, principalmente pelo uso de maquinários pesados e pela intensificação do pastoreio, é um dos potenciais impulsionadores na mudança do ambiente agrícola (ALAOUI et al., 2018). As máquinas agrícolas e o pastoreio são frequentemente manejados em solos com faixa inadequada de umidade e isto causa a compactação do solo, conseqüentemente ocasionando a sua degradação (NEIVA JÚNIOR et al., 2015).

As etapas de produção da cafeicultura são total ou parcialmente mecanizadas, desde o controle de plantas daninhas até a colheita. A mecanização otimiza o sistema agrícola e desenvolve a economia agrícola. Porém, o tráfego de máquinas aumenta a suscetibilidade à compactação do solo, pois as entrelinhas do cafeeiro são estreitas e frequentemente submetidas ao tráfego de máquinas e de implementos (IORI et al., 2014). A compactação do solo nas lavouras cafeeiras é dependente do tempo de cultivo, da declividade do terreno (IORI et al., 2014), da cobertura do solo (PIRES et al., 2017), do tipo de manejo (MOREIRA PAIS et al., 2011) e da intensidade do tráfego de máquinas.

A compactação é um processo que proporciona o aumento da resistência do solo à penetração, reduz a porosidade e diminui a permeabilidade e a disponibilidade de água e de nutrientes no solo (OLIVEIRA et al., 2010). Solos compactados podem afogar as lavouras em águas rasas, perturbar os regimes de nutrientes, impossibilitar o trabalho dos microrganismos e prejudicar a penetração das raízes das culturas agrícolas (STOESSEL et al., 2018). Em condições severas, a compactação do solo reduz a produtividade das culturas agrônômicas, pois induz à baixa germinação, à germinação tardia, à deformação de raiz e ao crescimento atrofiado da parte aérea (NAWAZ; BOURRIÉ; TROLARD, 2013).

A qualidade do solo é avaliada por meio de seus atributos físicos e hídricos, porém, relacionar a compactação do solo com o crescimento das plantas é necessário. A literatura disponível sobre o tema é deficiente em informações sobre esta relação para o cafeeiro e, assim, este estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o crescimento do cafeeiro em diferentes graus de compactação na subsuperfície do solo sob diferentes umidades.

2 - MATERIAL E MÉTODOS

2.1 - Local do estudo

O experimento foi conduzido, no período de janeiro a dezembro de 2018, em casa de vegetação na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, localizada na cidade de Diamantina, estado de Minas Gerais, Brasil (18°12'12.27"S, 43°34'17.95"O e altitude de 1.403 m).

2.2 - Delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, disposto em esquema fatorial 2 x 4, com quatro repetições. O primeiro fator corresponde a duas umidades do solo, 50% e 100%, na capacidade de campo (CC). O segundo fator corresponde à 60%, 70%, 80% e 90% de graus de compactação do solo. A parcela experimental constituiu-se de uma planta de café cultivada em coluna de policloreto de vinila (PVC), totalizando 32 unidades.

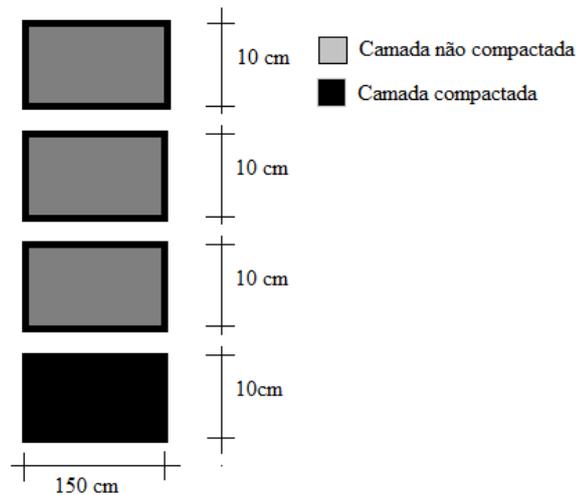
2.3 - Produção de mudas

As mudas de café foram produzidas em tubetes de 100 ml, contendo substrato comercial e esterco bovino na proporção 5:1, respectivamente. As sementes da cultivar Rubi MG 1192 foram imersas em hipoclorito de sódio (1%), por 4 minutos e, em seguida, enxaguadas com água destilada. As sementes foram semeadas nos tubetes e irrigadas diariamente. O período de formação das mudas foi de janeiro a maio de 2018, atingindo 5 pares de folhas e, em média, 11 cm de altura da parte aérea, 0,25 cm de diâmetro do caule, 6,5 g de peso verde total e 1,6 g de peso seco total. Essa avaliação inicial das plantas foi obtida por meio de dez mudas produzidas adicionalmente, que seguiram o mesmo padrão de crescimento das mudas utilizadas no experimento.

2.4 - Recipiente, substrato e compactação do solo

Tubos de PVC de 150 mm foram cortados horizontalmente, formando anéis com 10 cm de altura. Quatro anéis de PVC foram sobrepostos e colados com fita adesiva, construindo-se uma coluna de 40 cm de altura. A parede interna da coluna foi revestida com uma camada de 2 mm de espessura de parafina, evitando-se o escoamento lateral da água na região da interface solo/coluna (FIG. 1).

Figura 1 - Ilustração representativa da coluna de policloreto de vinila.



O substrato utilizado foi um Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico (Ferralsols) (SANTOS et al., 2018). O solo foi submetido ao ensaio de Proctor, conforme a norma NBR 7182 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1986), em que se obtém a máxima densidade do solo de acordo com a umidade ótima de compactação. A densidade máxima (DS_{max}) foi de $1,54 \text{ g cm}^{-3}$ com umidade ótima de 21%. A compactação do solo foi definida com graus de compactação (GC) de 60%, 70%, 80% e 90% e, a partir dessas determinações, calculou-se a densidade relativa (DR), $DR = \text{Densidade de campo} / DS_{m\acute{a}x}$; $GC = DR * 100$.

O solo foi submetido à análise química e granulométrica (TAB. 1) (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 1997), sendo peneirado em malha de 4 mm. O adubo superfosfato simples foi aplicado para o plantio das mudas de café, de acordo com a recomendação para o cafeeiro (GUIMARÃES et al., 1999). Posteriormente, o grau de compactação para cada tratamento foi aplicado somente no último anel de PVC, 30 a 40 cm de profundidade, representando uma compactação subsuperficial. O grau de compactação de 60% foi mantido para as demais profundidades da coluna, 0 a 30 cm (FIG. 1).

As mudas foram plantadas, nas colunas de PVC, no mês de junho e mantidas na umidade de 80% da CC. A CC foi determinada pela câmara de Richards (EMBRAPA, 1997) na tensão de 6 kPa, resultando em $0,34 \text{ kg kg}^{-1}$. O cafeeiro foi adubado em cobertura com a solução de 1% de sulfato de amônia, 80 ml da solução para cada planta, nos dias 15 e 25 dias após o plantio.

Tabela 1 - Caracterização do Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico (Ferralsols) utilizado para cultivo do cafeeiro antes da adubação.

pH(H ₂ O)	M.O.	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al
5,97	dag kg ⁻¹	.....mg dm ⁻³	.....	.....cmolc dm ⁻³	.....	.....	.....
	3,36	32,73	262,36	5,03	2,28	0,02	2,81
SB	t	T	m	V	Areia	Argila	Silte
.....cmolc dm ⁻³	.....	.....%	.....	.....dag kg ⁻¹	.....	.....	.....
8,08	8,10	10,89	0	74	25	51	24

pH água - relação solo-água 1:2,5; P, K, Cu, Fe, Mn e Zn - extrator Mehlich-1; Ca, Mg e Al - extrator KCl 1 mol L⁻¹; H+Al - extrato acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹; M.O. = matéria orgânica - método colorimétrico; SB – soma de bases; t – capacidade de troca de cátions efetiva; T - capacidade de troca de cátions a pH 7,0; m - saturação de alumínio; V - saturação por bases.

2.5 - Condução do experimento

Após 30 dias de plantio, os tratamentos 50% e 100% da CC foram aplicados nas parcelas experimentais. O controle da umidade do solo foi realizado por meio de um medidor eletrônico de umidade do solo (Hidrofarm - modelo HFM2030), irrigando até atingirem a umidade do solo correspondente de cada tratamento.

Aos 180 dias após o plantio, o experimento foi avaliado e as plantas foram mensuradas quanto à altura, ao diâmetro do caule, à área foliar (ANTUNES et al., 2008), ao número de ramos plagiotrópicos e de folhas e ao peso seco das folhas e do caule. O peso seco foi determinado em estufa de circulação forçada de ar, a 65 °C, até atingir peso constante.

As colunas foram fracionadas de acordo com os anéis, de 10 em 10 cm de profundidade do solo. O solo de cada anel foi peneirado para separar as raízes. As raízes foram lavadas com água corrente e colocadas em estufas e, assim, obteve-se o peso seco para cada profundidade correspondente. Posteriormente, o peso seco total das raízes foi o somatório dos quatro anéis.

2.6 - Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$), no qual se realizou o desdobramento da interação significativa, por meio da análise de regressão entre as densidades relativas. Os dados das raízes foram submetidos ao teste de Tukey, a 5%.

3 - RESULTADOS

A densidade relativa do solo nos gráficos representou o seu grau de compactação (GC) dividido por 100. Com 60% GC foi um solo com estrutura mais solta, menor densidade e, com 90% GC, ele ficou mais adensado e atinge elevada compactação. A capacidade de

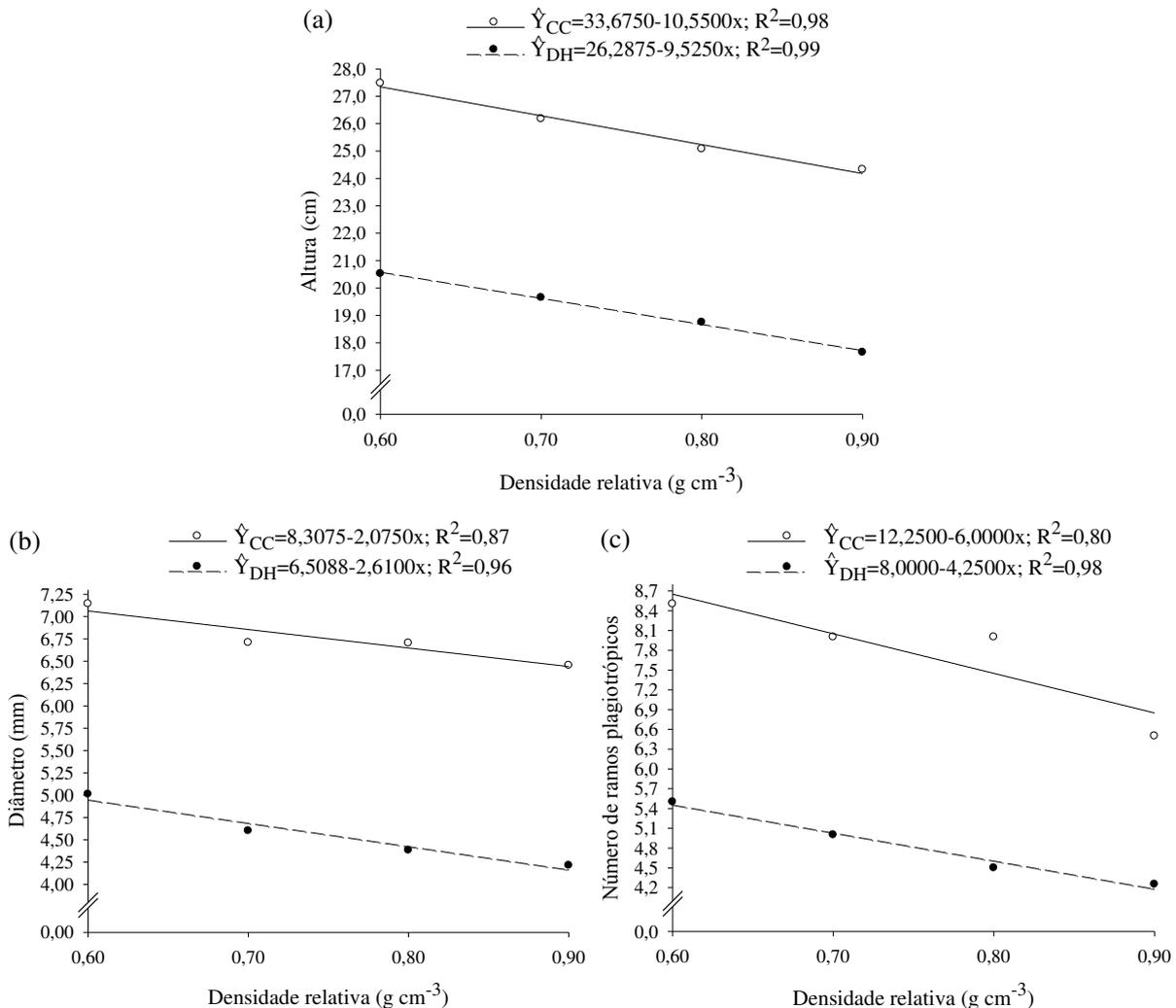
campo do solo (CC) 100% foi o estado ótimo de disponibilidade de água para a cultura do café, ao contrário do solo com 50% CC. O solo com umidade de 50% CC teve um déficit hídrico, devido à menor disponibilidade de água.

A altura das plantas de café diminuiu com o aumento do GC, com relação inversamente proporcional das variáveis. O solo com elevado GC diminuiu em 13% a altura do cafeeiro, quando comparado com o solo de partículas mais soltas. A disponibilidade de água, quando restrita, agravou esse crescimento em 16%. O cultivo do cafeeiro na CC proporcionou uma maior altura das plantas em relação ao cultivo na umidade de 50% CC. O cafeeiro, quando submetido ao déficit hídrico no solo (50% CC), diminuiu seu crescimento em 34% (FIG.2a).

O aumento do GC e a redução da disponibilidade de água diminuíram o diâmetro do caule do cafeeiro. Na condição de CC, o solo com 90% GC reduziu esse diâmetro em 11%, comparado ao solo com 60% GC. Na condição de 50% CC, esse fato foi agravado com redução de 19% do diâmetro do caule. O cafeeiro diminuiu o seu diâmetro de caule em 49% na condição de déficit hídrico, quando comparado ao estado ótimo de umidade do solo (FIG. 2b).

O número de ramos plagiotrópicos do cafeeiro foi inversamente proporcional ao GC. O cultivo de café em elevado GC diminuiu o crescimento de ramos plagiotrópicos em 30%, quando comparado com o solo de menor GC, independente da umidade do solo. O déficit de água no solo diminuiu drasticamente o número de ramos, mais de 50%, quando comparado com a CC (FIG. 2c).

Figura 2 - Altura (a), diâmetro do caule (b) e número de ramos plagiotrópicos (c) do cafeeiro para diferentes umidades do solo sob diferentes densidades relativas do solo (graus de compactação), na profundidade de 30 a 40 cm. Capacidade de campo do solo (CC) e déficit hídrico (DH) = 50 % da CC.

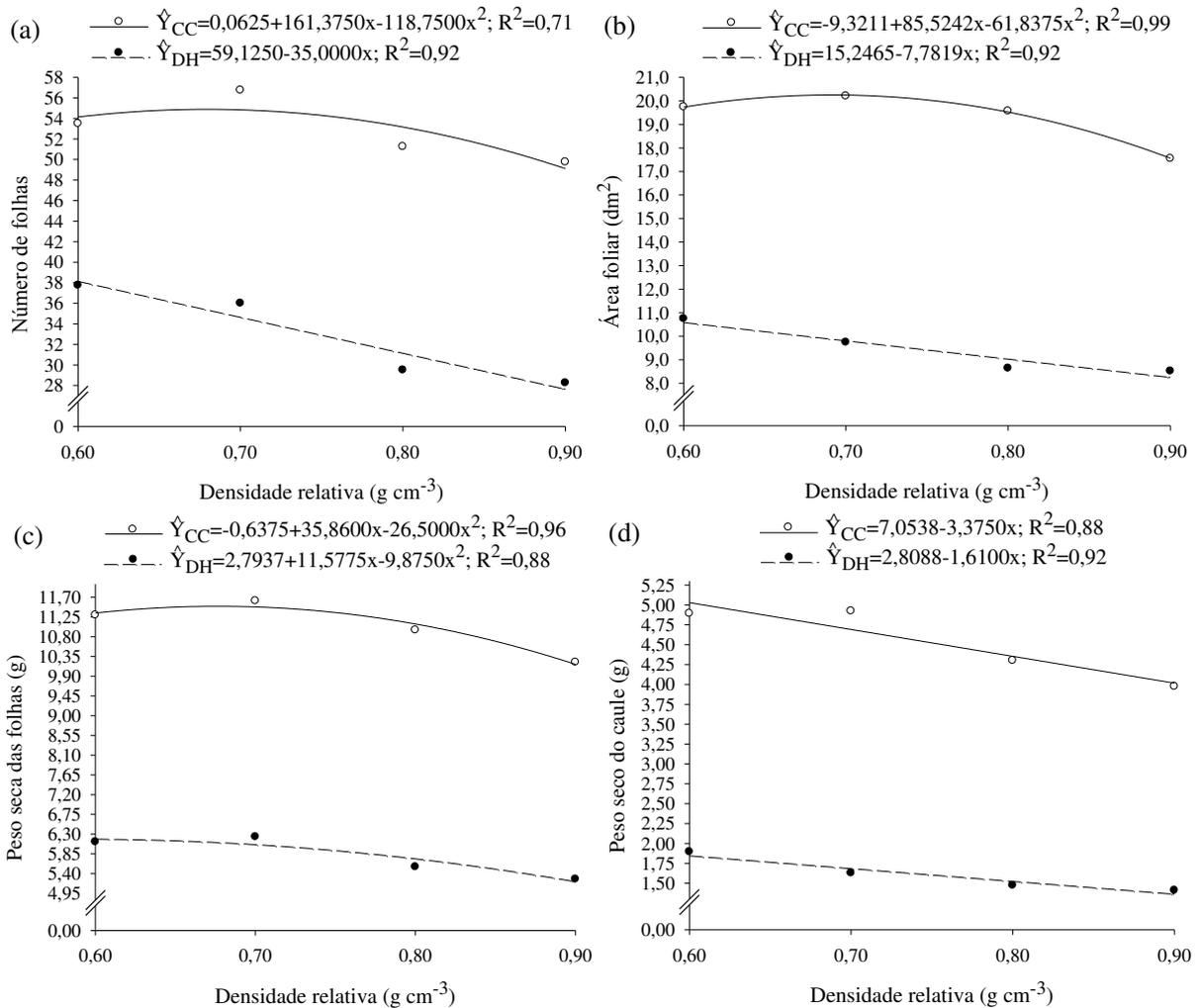


O cafeeiro na CC teve maior número de folhas no GC 68%. Quando submetido à 50% CC, o número de folhas diminuiu com o aumento do GC, 35% de redução no GC 90% em relação ao GC 60%. A comparação entre 100% e 50% CC revelou diferença de 62%, sendo que a primeira umidade do solo atinge o maior número de folhas (FIG. 3a).

A área foliar do cafeeiro foi maior no GC 69% em condição ótima de umidade do solo. Na condição de 50% CC, a relação da área foliar e GC foi inversamente proporcional, apresentando diferença de 26% na área foliar entre o 60% e 90% GC. A área foliar variou expressivamente entre as umidades do solo; na CC apresentou o dobro do valor da condição de 50% CC (FIG. 3b).

O peso seco das folhas foi maior no GC 68 e 60% em 100% e 50% CC, respectivamente. O cafeeiro diminuiu em 90% a produção de matéria seca das folhas no solo com baixa disponibilidade de água em relação à umidade na CC (FIG. 3c). O peso seco do caule do cafeeiro diminuiu com o aumento do GC. O GC 90% diminuiu em 23% e 34% a produção de matéria seca na 100% e na 50% CC, respectivamente, em relação ao GC 60%. A planta produziu 184% mais matéria seca do caule na 100% CC do que na 50% CC (FIG. 3d).

Figura 3 - Número de folhas (a), área foliar (b), peso seco das folhas (c) e peso seco do caule (d) do cafeeiro para diferentes umidades do solo sob diferentes densidades relativas do solo (graus de compactação), na profundidade de 30 a 40 cm. Capacidade de campo do solo (CC) e déficit hídrico (RH) = 50% da CC.



O peso seco total da raiz apresentou diferença entre as umidades do solo, porém, no GC não apresentou diferença entre os tratamentos. A raiz do cafeeiro cresceu 137% na condição de CC do que na de 50% CC. No fracionamento da raiz com base na profundidade

do solo houve diferença no seu peso seco. As raízes na CC apresentaram interação entre o GC e a profundidade do solo. As profundidades do solo foram representadas por camadas e, assim, as profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30 e 30 a 40 cm corresponderam a 1^a, 2^a, 3^a e 4^a camada, respectivamente (TAB. 2).

Tabela 2 - Peso seco total da raiz do cafeeiro sob diferentes umidades do solo e peso seco das raízes (g) para diferentes profundidades do solo sob diferentes graus de compactação do solo.

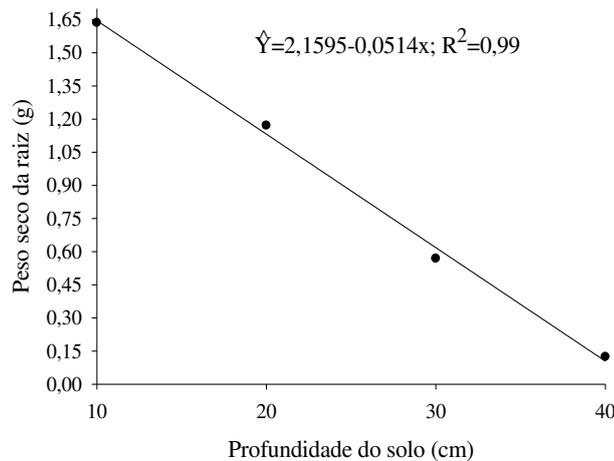
Capacidade de campo do solo (%)	Peso seco total da raiz (g)			
50	3,4969 B			
100	8,2913 A			
CV (%)	11,53			
Graus de compactação (%)	Profundidade das raízes (cm) ⁽¹⁾			
	0 a 10	10 a 20	20 a 30	30 a 40 ⁽²⁾
60	3,0348 Ba	1,8314 Ab	1,7078 Ab	1,6304 Ab
70	3,6588 Aa	1,9024 Ab	1,9644 Ab	1,1891 Ac
80	3,6732 Aa	2,0785 Ab	2,0137 Ab	0,5832 Bc
90	3,3649 ABa	1,8477 Ab	2,2650 Ab	0,4839 Bc
CV (%)	14,33			

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade; ⁽¹⁾cafeeiro cultivado na capacidade de campo do solo (0,34 kg kg⁻¹); ⁽²⁾somente nessa profundidade variou o grau de compactação (GC), as demais foram mantidas a 60% GC.

A 1^a camada de solo apresentou o maior acúmulo de raiz para todos os GC. Em 60% GC, a 2^a, a 3^a e a 4^a camada, os pesos secos de raízes foram iguais e diferentes da 1^a camada. Nos demais GC, a 4^a camada apresentou menor peso seco de raízes em relação às outras camadas; a 2^a e a 3^a camada foram iguais. O peso seco das raízes, comparando-se os GC para cada camada de solo, demonstrou diferença mais expressiva na 4^a camada. Nessa camada de solo, o peso seco das raízes foi menor no 80% e no 90% GC e maior no 60% e 70% GC (TAB. 2).

O cafeeiro cultivado na umidade 50% CC diminuiu o peso seco das raízes da menor profundidade (0 a 10 cm) para a maior (30 a 40 cm); 80% das raízes acumularam na profundidade de 0 a 20 cm. Nessa umidade do solo não houve diferença entre os GC (FIG. 4).

Figura 4 - Peso seco da raiz do cafeeiro para diferentes profundidades do solo sob déficit hídrico (50% da capacidade de campo do solo = 0,17 kg kg⁻¹).



4 - DISCUSSÃO

Altura, diâmetro do caule, números de ramos e peso seco do caule do cafeeiro tiveram o mesmo comportamento com a variação do GC, independente da umidade do solo. Essas variáveis diminuem seus valores à medida que aumenta o GC. Número de folhas, área foliar e peso seco das folhas do cafeeiro apresentaram comportamento quadrático com valores máximos no GC aproximado de 70%, somente na CC. Em 50% CC, essas variáveis relacionadas às folhas apresentaram comportamento linear inversamente proporcional.

No geral, o cafeeiro diminuiu seu crescimento quando aumentou o grau de compactação (GC) na camada subsuperficial do solo. A compactação modificou os atributos físicos do solo de forma negativa, interferindo diretamente no desenvolvimento da planta. As principais modificações foram redução da porosidade do solo (BARIK et al., 2014; LIMA et al., 2017) e aumento da densidade do solo (BARIK et al., 2014) e da resistência à penetração (BEULTER; CENTURION, 2004).

A porosidade é o espaço vazio do solo e constitui da fase líquida e gasosa, e, assim, a redução desse espaço influenciou a quantidade de água e de gases no solo. O aumento do GC diminuiu o tamanho dos poros e, conseqüentemente, diminuiu a concentração de O_2 e a permeabilidade da água no solo (CAMBI et al., 2015). As plantas privadas de O_2 no solo inibiram a condutividade hidráulica das raízes, o que levou ao fechamento estomático (TAN et al., 2018).

A resistência do solo à penetração diminuiu o crescimento radicular (BEULTER; CENTURION, 2004) e, conseqüentemente, afetou a absorção de água e nutrientes pela menor área de solo explorada. O comportamento desse atributo físico variou em função da umidade do solo; assim, à medida que o solo perdeu umidade aumentou a resistência à penetração (BAIO et al., 2017; SILVA; BIANCHINI; CUNHA, 2016). Neste estudo obtiveram-se duas

situações de umidade do solo e conclui-se que a capacidade de campo (CC) tem menor resistência do solo à penetração em relação à 50% CC.

Considerando as características avaliadas neste estudo, o solo na CC proporcionou maior crescimento das plantas com relação ao solo com 50% CC. A disponibilidade de água afetou o desenvolvimento do cafeeiro, reduzindo seu crescimento à medida que diminuiu a umidade do solo (MOREIRA et al., 2018). Plantas de café irrigadas cresceram mais do que plantas em sequeiro (SAKAI et al., 2015) ou em déficit de irrigação (LIU et al., 2016).

A taxa de crescimento relativo do cafeeiro foi maior na CC do que no déficit hídrico (CAVATTE et al., 2012). As raízes das plantas absorvem água e nutrientes do solo para serem utilizados nos processos metabólicos e no crescimento. A planta transpira a maior parte da água absorvida pelas raízes e somente 3% são utilizados, porém, a falta de água implica grandes prejuízos. A expansão celular foi o processo mais afetado em condições de déficit hídrico no solo. A baixa umidade do solo inibiu a expansão foliar e o crescimento do caule (TAIZ et al., 2017).

O peso seco total de raízes não apresentou diferença entre os GC, porém, quando quantificado em profundidade na CC apresentou diferença. O GC fez com que o sistema radicular alterasse seu crescimento em profundidade, mas não a sua quantidade total. Como meio de compensar o menor desenvolvimento nas camadas compactadas, as raízes aumentaram seu desenvolvimento nas camadas menos compactadas (BEUTLER; CENTURION, 2004). No déficit hídrico, o crescimento das raízes em profundidade não foi responsivo ao GC, pois a falta de água reduziu o alongamento das raízes de forma que não atingiu a camada compactada de forma expressiva.

5 - CONCLUSÃO

O crescimento do cafeeiro foi mais responsivo à umidade do solo do que à compactação subsuperficial do solo. A baixa umidade do solo diminuiu consideravelmente o crescimento do cafeeiro, principalmente o sistema radicular. A compactação subsuperficial do solo inibiu o crescimento inicial do cafeeiro, o que foi agravado quando ela foi associada ao déficit hídrico.

6 - AGRADECIMENTOS

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

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAOUI, A. et al. Does soil compaction increase floods? A review. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, Netherlands, v. 557, p. 631-642, fev. 2018.
- ANTUNES, W. C. et al.. Allometric models for non-destructive leaf area estimation in coffee (*Coffea arabica* and *Coffea canephora*). **Annals of Applied Biology**, London, v. 153, n. 1, p. 33–40, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT . NBR 7182: **Solo: ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 1986. 10p.
- BAIO, F. H. R. et al. Soil resistance to penetration in cotton rows and interrows. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 6, p. 433-439, jun. 2017.
- BARIK, K. et al. Spatial variability in soil compaction properties associated with field traffic operations. **Catena**, Amsterdam, Netherlands, v. 120, p. 122-133, set. 2014.
- BEUTER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 581-588, jun. 2004.
- CAMBI, M. et al. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, Netherlands, v. 338, p. 124-138, fev. 2015.
- CAVATTE, P. C. et al. Functional analysis of the relative growth rate, chemical composition, construction and maintenance costs, and the payback time of *Coffea arabica* L. leaves in response to light and water availability. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, England, v. 63, n. 8, p. 3071–3082, maio 2012.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2^a ed. Brasília, DF: Centro Nacional de Pesquisas do Solo; 1997. 212 p.
- GUIMARÃES, P. T. G. et al. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A. C.; GONTIJO, P. T.; ALVAREZ, V. H. (Ed). Comissão de fertilidade do solo do estado de minas gerais. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5^a aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais; 1999. p.289-302.
- IORI, P. et al. Influence of field slope and coffee plantation age on the physical properties of a Red-Yellow Latosol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 107-117, jan./fev. 2014.

LIMA, R. P. et al. Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. **Biosystems Engineering**, San Diego, v. 162, p. 1-10, out. 2017.

LIU, X. et al. Effects of deficit irrigation on yield and nutritional quality of Arabica coffee (*Coffea arabica*) under different N rates in dry and hot region of southwest China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, Netherlands, v. 172, p. 1-8, jul. 2016.

MOREIRA, S. D. et al. Inoculation with mycorrhizal fungi on the growth and tolerance to water deficit of coffee plants. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 11, p. 747-752, nov. 2018.

NAWAZ, M. F.; BOURRIÉ, G.; TROLARD, F. Soil compaction impact and modelling. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, France, v. 33, n. 2, p. 291-309, abr. 2013.

NEIVA JÚNIOR, E. et al. Compressibility and penetrability of latossolo Vermelho-amarelo distrófico (oxisol) under varied Management systems and land uses. **Revista Brasileira de Ciência dos Solo**, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 86-93, jan./fev. 2015.

OLIVEIRA, V. S. et al. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 14, n. 9, p. 914-920, set. 2010.

PAIS, P. S. A. M. et al. Compactação causada pelo manejo de plantas invasoras em Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 1949-1957, nov./dez. 2011.

PIRES, L. F. et al. Soil physico-hydrical properties changes induced by weed control methods in coffee plantation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, Netherlands, v. 246, p. 261-268, ago. 2017.

SAKAI, E. et al. Coffee productivity and root systems in cultivation schemes with different population arrangements and with and without drip irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, Netherlands, v. 148, P. 16-23, jan. 2015.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF : Embrapa, 2018. 356 p.

SILVA, W. M.; BIANCHINI, A.; CUNHA, C. A. Modeling and correction of soil penetration resistance for variations in soil moisture and soil bulk density. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP, v.36, n.3, p.449-459, maio/jun. 2016.

STOESSEL, F. et al. Assessing the environmental impacts of soil compaction in Life Cycle Assessment. *Science of the Total Environment*, Amsterdam, Netherlands, v. 630, p. 913-921, jul. 2018.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888p.

TAN, X. et al. Plant water transport and aquaporins in oxygen-deprived environments. **Journal of Plant Physiology**, Jena, Germany, v. 227, p. 20-30, ago. 2018.

Artigo IV

INTERAÇÃO COMPACTAÇÃO E UMIDADE DO SOLO NAS RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DE MUDAS DE CAFÉ RECÉM-PLANTADAS**RESUMO**

No campo, o cafeeiro está sujeito ao estresse da compactação do solo e da falta de água, que podem causar alterações nas respostas fisiológicas da planta. Este estudo foi realizado com o objetivo de avaliar as respostas fisiológicas do cafeeiro sob diferentes umidades e graus de compactação na subsuperfície do solo. O delineamento experimental foi em blocos, disposto em esquema fatorial, com quatro repetições. O primeiro fator corresponde a duas umidades, 50% e 100% da capacidade de campo do solo. O segundo fator corresponde a 60%, 70%, 80% e 90% de compactação subsuperficial do solo. A parcela experimental constituiu-se de uma planta de *Coffea arabica* L. cultivada em coluna de policloreto de vinila. As respostas fisiológicas foram avaliadas aos 180 dias de plantio. A taxa fotossintética, o carbono consumido, a concentração de CO₂ na câmara subestomática, a relação carbono interno/carbono atmosférico, a eficiência do uso da água e a taxa de crescimento absoluto do cafeeiro foram influenciados pelos diferentes graus de compactação e umidades do solo. A taxa de transpiração e a razão peso radicular foram influenciadas somente pelas umidades, ao contrário da condutância estomática e da temperatura foliar que foram influenciadas pelos graus de compactação. A razão sistema radicular por camada de solo foi influenciada pelos graus de compactação e a profundidade do solo. A limitação do crescimento das raízes e a falta de água são as principais causas do decréscimo das respostas fisiológicas. A compactação subsuperficial e o déficit hídrico, juntos, potencializam o efeito negativo nas respostas fisiológicas das mudas de café recém-plantadas.

Palavras-chave: *Coffea arabica*, déficit hídrico, disponibilidade de água, fatores abióticos, fisiologia vegetal.

INTERACTION SOIL COMPACTION AND SOIL MOISTURE IN PHYSIOLOGICAL RESPONSES OF FRESHLY PLANTED COFFEE

ABSTRACT

In the field, coffee is subject to the stress of soil compaction and lack of water, which may cause changes in the physiological responses of the plant. The objective of this study was to evaluate the physiological responses of the coffee tree under different soil moisture content and compaction degrees in the soil subsurface. The experimental design was in blocks, arranged in a factorial scheme, with four replications. The first factor corresponds to the two wetlands, 50 and 100% of the soil field capacity. The second factor corresponds to 60, 70, 80 and 90% of soil subsurface compaction. The experimental plot consisted of a *Coffea arabica* L. plant grown on a polyvinyl chloride column. The physiological responses were evaluated at 180 days of planting. The photosynthetic rate, carbon consumption, CO₂ concentration in the substamatic chamber, internal carbon / atmospheric carbon ratio, water efficiency and absolute coffee growth rate were influenced by the different compaction degrees and soil moisture content. The transpiration rate and the root weight ratio were influenced only by the humidity, as opposed to the stomatal conductance and the foliar temperature, which were by degrees of compaction. The ratio of root system per soil layer was influenced by compaction degrees and soil depth. The limitation of root growth and lack of water are the main causes of the decrease in physiological responses. Subsurface compaction and water deficit together potentiate the effect negatively on the physiological responses of freshly seeded coffee plants.

Keywords: *Coffea arabica*, water deficit, water availability, abiotic factors, plant physiology.

1 - INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo, tendo registrado uma produção recorde de 62,5 milhões de sacas beneficiadas no ano-safra de março de 2018 a abril de 2019 (INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION - ICO, 2019). As lavouras de café no país ocupam uma área total de 2,16 milhões de hectares, dos quais 15% estão em formação e 85% em produção (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2019).

As tecnologias são de grande importância para a cafeicultura, como, por exemplo, a irrigação que possibilitou a expansão da cafeicultura para áreas com déficit hídrico. A irrigação garante uma maior produtividade (SAKAI et al., 2015; FERNANDES et al., 2016) e qualidade do café (SAKAI et al., 2013). As máquinas participam de forma parcial ou total nas operações de produção do café e alguns dos benefícios são custo-benefício e rendimento operacional. A colheita mecanizada, por exemplo, é mais viável do que a colheita manual, pois proporciona melhor resposta dos indicadores econômicos (LANNA; REIS, 2012), redução no custo operacional e maior rendimento (SANTINATO et al., 2015).

O uso intensificado de máquinas na cafeicultura exerce grande pressão no solo e, conseqüentemente, aumenta a densidade das partículas e, em situação excessiva, provoca compactação do solo. A compactação diminui a porosidade, a permeabilidade de água, a disponibilidade de água e de nutrientes e aumenta a resistência do solo à penetração (OLIVEIRA et al., 2010). O sistema de cultivo mecanizado em plantações de café provoca maior resistência do solo à penetração, principalmente na linha de tráfego, em relação ao sistema de cultivo manual (PALMA et al., 2013).

A umidade do solo tem relação direta com a resistência do solo à penetração das raízes das plantas (SILVEIRA et al., 2010), bem como com a compactação do solo. O tráfego intensivo de máquinas causa compactação excessiva do solo nas plantações de café e a umidade inadequada potencializa a agregação das partículas (KAMIMURA et al., 2012). A intensidade do tráfego de máquinas, associada aos altos níveis de água no solo, reduz a produtividade e a altura das plantas de soja, devido à compactação do solo (OLIVEIRA et al., 2012). Aconselha-se evitar o tráfego de máquinas quando a umidade do solo é alta, pois resulta em aumento da densidade do solo, bem como a compactação (AHMADI; GHOUR, 2015).

Apesar dos benefícios para a produção de café, o tráfego de máquinas e a irrigação podem, manejados de forma inadequada, provocar compactação e excesso de água no solo, respectivamente, comprometendo o desenvolvimento da cultura. Este estudo foi

realizado com o objetivo de avaliar as respostas fisiológicas do cafeeiro sob diferentes umidades e graus de compactação na subsuperfície do solo.

2 - MATERIAL E MÉTODOS

2.1 - Local do estudo

O experimento foi conduzido, no período de janeiro a dezembro de 2018, em casa de vegetação na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, localizada na cidade de Diamantina, estado de Minas Gerais, Brasil (18°12'12.27"S, 43°34'17.95"O e altitude de 1.403 m).

2.2 - Delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, disposto em esquema fatorial 2 x 4, com quatro repetições. O primeiro fator corresponde a duas umidades do solo, 50% e 100% da capacidade de campo do solo (CC). O segundo fator corresponde a 60%, 70%, 80% e 90% de graus de compactação do solo. A parcela experimental constituiu-se de uma planta de café por coluna de policloreto de vinila (PVC), totalizando 32 unidades.

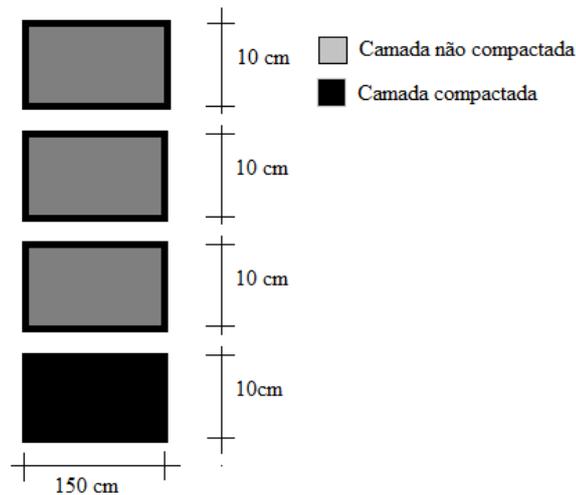
2.3 - Produção de mudas

As mudas de café foram produzidas em tubetes de 100 ml, contendo substrato comercial e esterco bovino na proporção 5:1, respectivamente. As sementes da cultivar Rubi MG 1192 foram imersas em hipoclorito de sódio (1%), por 4 minutos e, em seguida, enxaguadas com água destilada. As sementes foram semeadas nos tubetes e irrigadas diariamente. O período de formação das mudas foi de janeiro a maio de 2018, atingindo cinco pares de folhas e, em média, 11 cm de altura da parte aérea, 0,25 cm de diâmetro do caule, 6,5 g de peso verde total e 1,6 g de peso seco total. Essa avaliação inicial das plantas foi obtida por meio de dez mudas produzidas adicionalmente, que seguiram o mesmo padrão de crescimento das mudas utilizadas no experimento.

2.4 - Recipientes, substratos e compactação do solo

Tubos de PVC de 150 mm foram cortados horizontalmente, formando anéis com 10 cm de altura. Quatro anéis de PVC foram sobrepostos e colados com fita adesiva, construindo-se uma coluna de 40 cm de altura. A parede interna da coluna foi revestida com uma camada de 2 mm de espessura de parafina, para evitar o escoamento lateral da água na região da interface solo/coluna (FIG.1).

Figura 1 - Ilustração representativa da coluna de policloreto de vinila.



O substrato utilizado foi um Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico (Ferralsols) (SANTOS et al., 2018). O solo foi submetido ao ensaio de Proctor, conforme a norma NBR 7182 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1986), em que se obtém a máxima densidade do solo de acordo com a umidade ótima de compactação. A densidade máxima ($DS_{máx}$) foi de $1,54 \text{ g cm}^{-3}$, com umidade ótima de 21%. A compactação do solo foi definida com graus de compactação (GC) 60%, 70%, 80% e 90% e, a partir dessas determinações, calculou-se a densidade relativa (DR), $DR = \text{Densidade de campo} / DS_{máx}$; $GC = DR * 100$.

O solo foi submetido à análise química e granulométrica do solo (TAB. 1) (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 1997), sendo peneirado em malha de 4 mm. O adubo superfosfato simples foi aplicado para o plantio das mudas de café de acordo com a recomendação para o cafeeiro (GUIMARÃES et al., 1999). Posteriormente, o grau de compactação para cada tratamento foi aplicado somente no último anel de PVC, 30 a 40 cm de profundidade, representando uma compactação subsuperficial. O grau de compactação de 60% foi mantido para as demais profundidades da coluna, 0 a 30 cm (FIG. 1).

As mudas foram plantadas, nas colunas de PVC, no mês de junho e mantidas na umidade de 80% da CC. A CC foi determinada pela câmara de Richards (EMBRAPA, 1997) na tensão de 6 kPa, resultando em $0,34 \text{ kg kg}^{-1}$. O cafeeiro foi adubado em cobertura com a solução de 1% de sulfato de amônia, 80 ml da solução para cada planta, nos dias 15 e 25 dias após o plantio.

Tabela 1 - Caracterização do Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico (Ferralsols) utilizado para cultivo do cafeeiro antes da adubação.

pH(H ₂ O)	M.O.	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al
5,97	dag kg ⁻¹	.....mg dm ⁻³	.....	.....cmolc dm ⁻³	.....	.....	.....
	3,36	32,73	262,36	5,03	2,28	0,02	2,81
SB	t	T	m	V	Areia	Argila	Silte
.....cmolc dm ⁻³	.....	.....%	.....	.....dag kg ⁻¹	.....	.....	.....
8,08	8,10	10,89	0	74	25	51	24

pH água - relação solo-água 1:2,5; P, K, Cu, Fe, Mn e Zn - extrator Mehlich-1; Ca, Mg e Al - extrator KCl 1 mol L⁻¹; H+Al - extrato acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹; M.O. = matéria orgânica - método colorimétrico; SB – soma de bases; t – capacidade de troca de cátions efetiva; T - capacidade de troca de cátions a pH 7,0; m - saturação de alumínio; V - saturação por bases.

2.5 - Condução do experimento e avaliação

Após 30 dias de plantio, os tratamentos 50% e 100% da CC foram aplicados nas parcelas experimentais. O controle da umidade do solo foi realizado por meio de um medidor eletrônico (Hidrofarm - modelo HFM2030), irrigando-se até atingirem a umidade do solo correspondente de cada tratamento.

Aos 180 dias após o plantio, o experimento foi avaliado. As características fisiológicas, compreendendo taxa fotossintética, carbono consumido, concentração de CO₂ na câmara subestomática, relação carbono interno/carbono atmosférico, condutância estomática, taxa de transpiração, temperatura da folha e a eficiência no uso da água (fotossíntese/transpiração), foram medidas utilizando-se um analisador de gases por infravermelho (IRGA), marca ADC, modelo LCA 4 (Analytical Development Co. Ltda, Hoddesdon, UK) sob irradiação de saturação de 1.200 μmol fótons m⁻² s⁻¹. As características fisiológicas foram mensuradas em três folhas completamente expandidas e saudáveis, posicionadas no terço médio do cafeeiro. As avaliações foram realizadas entre as 8 e 10 horas, com o céu limpo e iluminação natural.

O peso seco da parte aérea do cafeeiro foi determinado em estufa de circulação forçada de ar, a 65 °C, até atingir peso constante. A taxa de crescimento absoluto (TCA) do cafeeiro foi calculada por meio da equação $TCA = (\text{peso seco inicial} - \text{peso seco final}) / 180$ dias; peso seco inicial, peso seco final e 180 dias são referentes ao peso médio das mudas, peso após os 180 dias de plantio e intervalo de tempo entre as duas amostras, respectivamente.

Nas colunas, as raízes foram fracionadas de acordo com os anéis, de 10 em 10 cm de profundidade, e peneiradas para separá-las do solo. As raízes foram lavadas com água corrente e colocadas em estufas, obtendo-se o peso seco para cada profundidade correspondente. Posteriormente, o peso seco total das raízes foi o somatório das quatro

camadas. A razão peso radicular (RPR) e a razão sistema radicular do cafeeiro por camada de solo (RSRC) foram calculadas pela relação entre o peso seco total das raízes e o peso seco total do cafeeiro e pela relação peso seco das raízes de determinada camada e peso seco total das raízes, respectivamente.

2.6 - Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($p \leq 0,05$), no qual se realizou o desdobramento da interação significativa, por meio da análise de regressão entre as densidades relativas. Nos dados das raízes foi realizado o teste de Tukey, a 5%.

3 - RESULTADOS

A umidade do solo e o grau de compactação do solo alteraram as respostas fisiológicas do cafeeiro. O grau de compactação do solo (GC) foi dado em porcentagem e representou a densidade relativa (g cm^{-3}) com base na densidade máxima. As umidades 50% e 100% da capacidade de campo do solo (CC) representaram o déficit hídrico (DH) e a condição hídrica ótima para o crescimento do cafeeiro, respectivamente. A interação entre o DH e o aumento do GC afetaram negativamente as respostas fisiológicas do cafeeiro.

A taxa fotossintética, o carbono consumido, a concentração de CO_2 na câmara subestomática, a relação carbono interno/carbono atmosférico, a eficiência do uso da água e a taxa de crescimento absoluto do cafeeiro foram influenciados pelos diferentes graus de compactação e umidades do solo. A taxa de transpiração e a razão peso radicular foram influenciadas somente pelas umidades, ao contrário da condutância estomática e da temperatura foliar, que foram influenciadas pelos graus de compactação. A razão sistema radicular por camada de solo foi influenciada pelos graus de compactação e profundidade do solo.

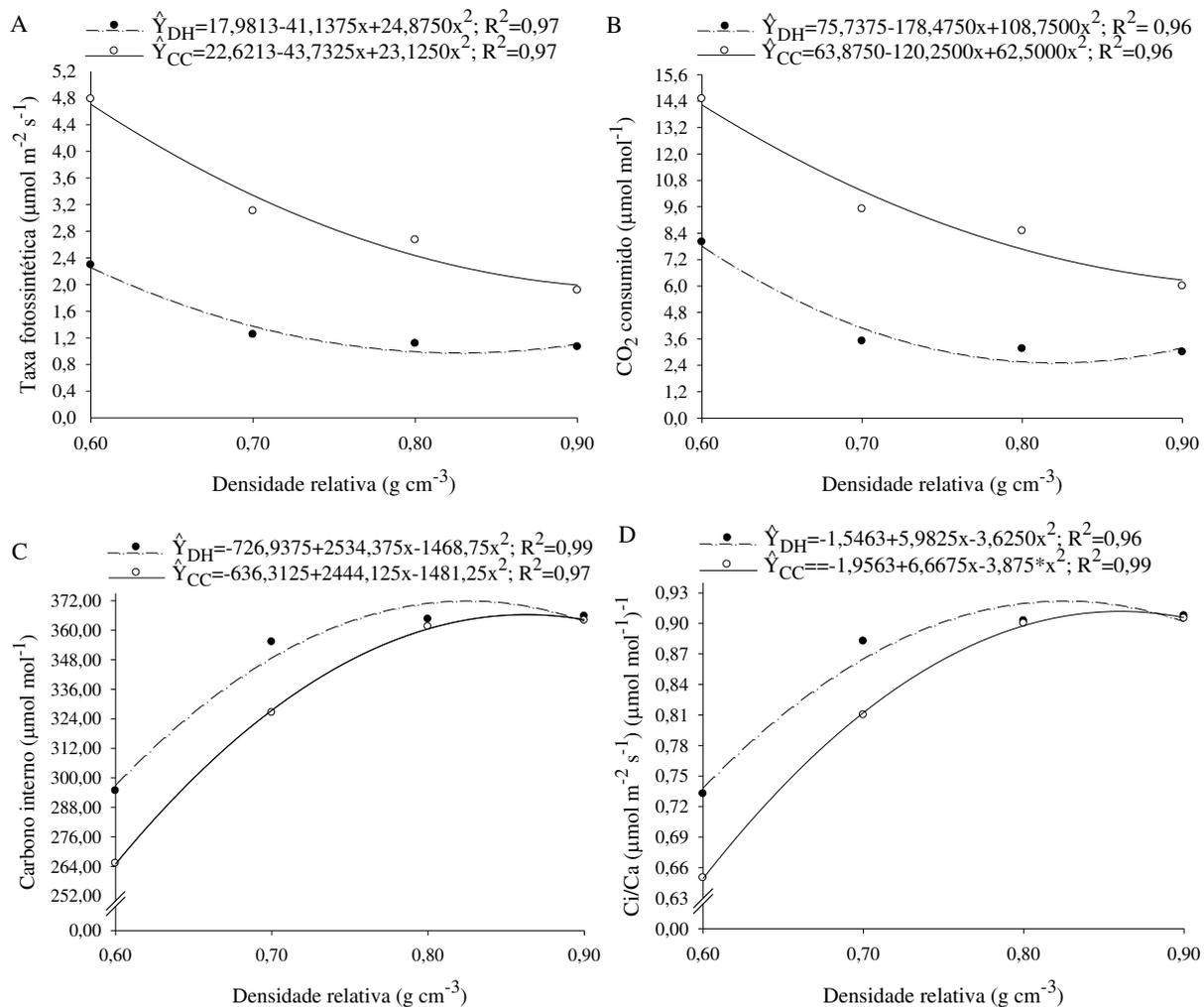
A taxa fotossintética do cafeeiro diminuiu com o aumento do GC na subsuperfície com variação acentuada na CC, porém, pouca variação no DH a partir dos 70% GC. O solo com 60% GC aumentou a taxa fotossintética em 115% e 150% no DH e na CC, respectivamente, em comparação com os 90% GC. O DH reduziu pela metade a taxa fotossintética em relação à CC. O cafeeiro na melhor condição, CC e 60% GC, aumentou em 250% a taxa fotossintética em comparação com a pior condição, DH e 90% GC (FIG. 2A).

O carbono consumido do cafeeiro teve comportamento semelhante ao da taxa fotossintética. O carbono consumido diminuiu com o aumento do GC na subsuperfície com variação acentuada na CC, porém, pouca variação no DH a partir dos 70% GC. O solo com

60% GC aumentou o carbono consumido em 167% e 142% no DH e na CC, respectivamente, em comparação com os 90% GC. A CC aumentou em 131% o carbono consumido em relação ao DH. O cafeeiro na melhor condição, CC e 60% GC, aumentou em 283% o carbono consumido em comparação com a pior condição, DH e 90% GC (FIG. 2B).

A concentração de CO₂ na câmara subestomática (FIG. 2C) e a relação carbono interno/carbono atmosférico (FIG. 2D) do cafeeiro apresentaram máximo valor em 83% e 86% GC no DH e na CC, respectivamente. O DH proporcionou maior concentração de CO₂ na câmara subestomática e maior relação carbono interno/carbono atmosférico em relação à CC, porém, os valores aproximaram-se a partir do 80% GC.

Figura 2 – Taxa fotossintética (A), carbono consumido (B), concentração de CO₂ na câmara subestomática (C) e relação carbono interno/carbono atmosférico (Ci/Ca) (D) do *Coffea arabica* L. (Rubi MG-1192) nas diferentes umidades e em diferentes densidades relativa do solo (graus de compactação), na profundidade de 30 a 40 cm; capacidade de campo do solo (CC) e restrição hídrica (RH) = 50 % da CC.



A condutância estomática do cafeeiro não apresentou diferença entre as umidades do solo. A relação entre a condutância estomática e o GC foi proporcionalmente inversa; os extremos do GC atingiram diferença de 80% (FIG. 3A). A taxa transpiratória do cafeeiro foi maior em condição de DH, aproximadamente 54% em relação à CC (TAB. 2). A temperatura da folha do cafeeiro aumentou à medida que aumentou o GC, porém, a variação de temperatura foi menor que 2 °C. A umidade do solo não apresentou influência na temperatura da folha (FIG. 3B).

Figura 3 – Condutância estomática de vapores de água (A), temperatura da folha (B), uso eficiente da água (C) e taxa de crescimento absoluto do cafeeiro (D) do *Coffea arabica* L. (Rubi MG-1192) nas diferentes umidades e em diferentes densidades relativa do solo (graus de compactação), na profundidade de 30 a 40 cm; capacidade de campo do solo (CC) e restrição hídrica (RH) = 50% da CC.

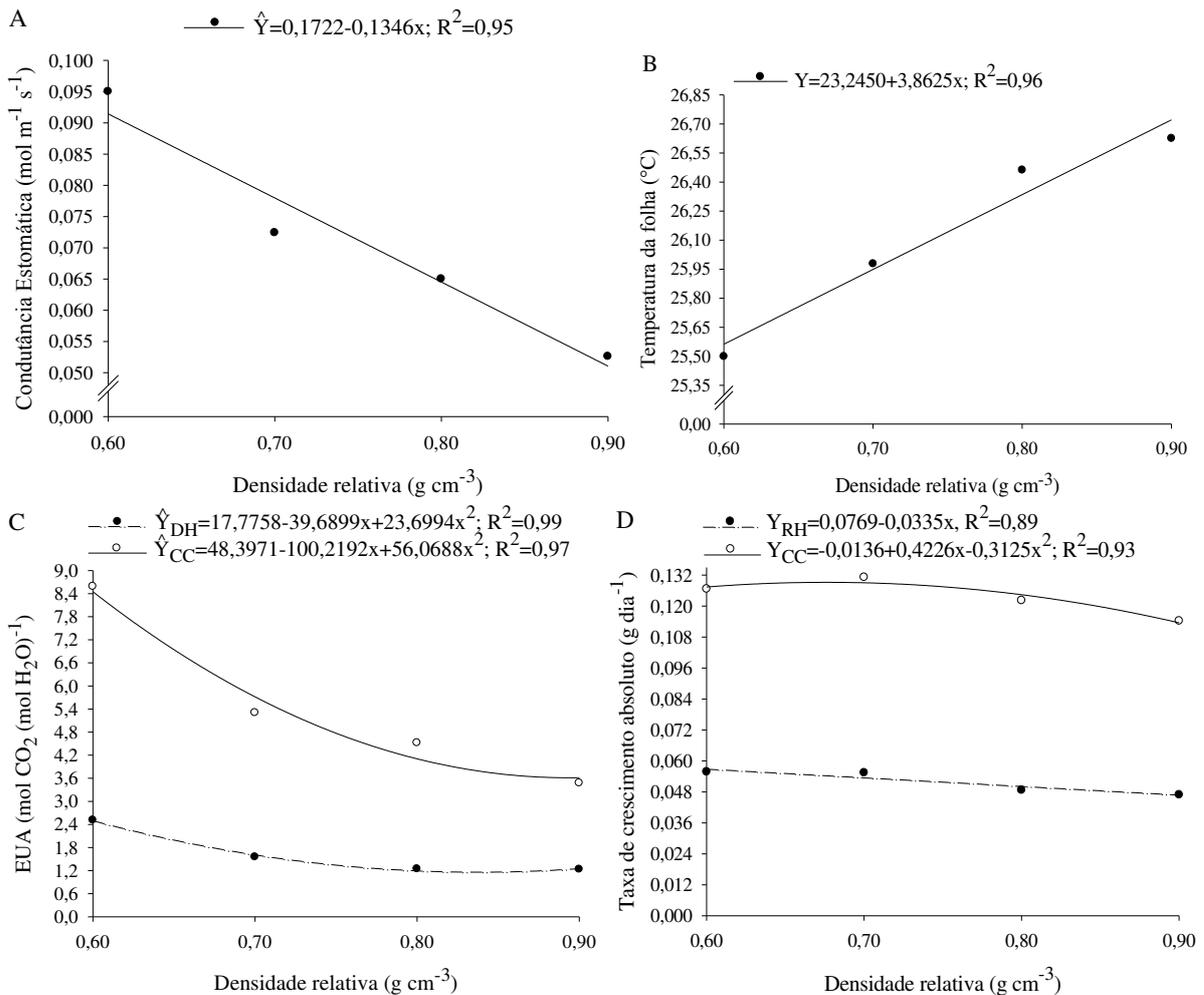


Tabela 2 – Taxa transpiratória e razão peso radicular do cafeeiro do *Coffea arabica* L. (Rubi MG-1192) na capacidade de campo 50% e 100%.

Capacidade de campo do solo (%)	Taxa transpiratória (mol H ₂ O m ² s ⁻¹)	Razão peso radicular (g/g)
50	0,8769 a	0,3198 b
100	0,5719 b	0,3474 a
Média geral	0,7244	0,3336
CV (%)	11,62	7,24

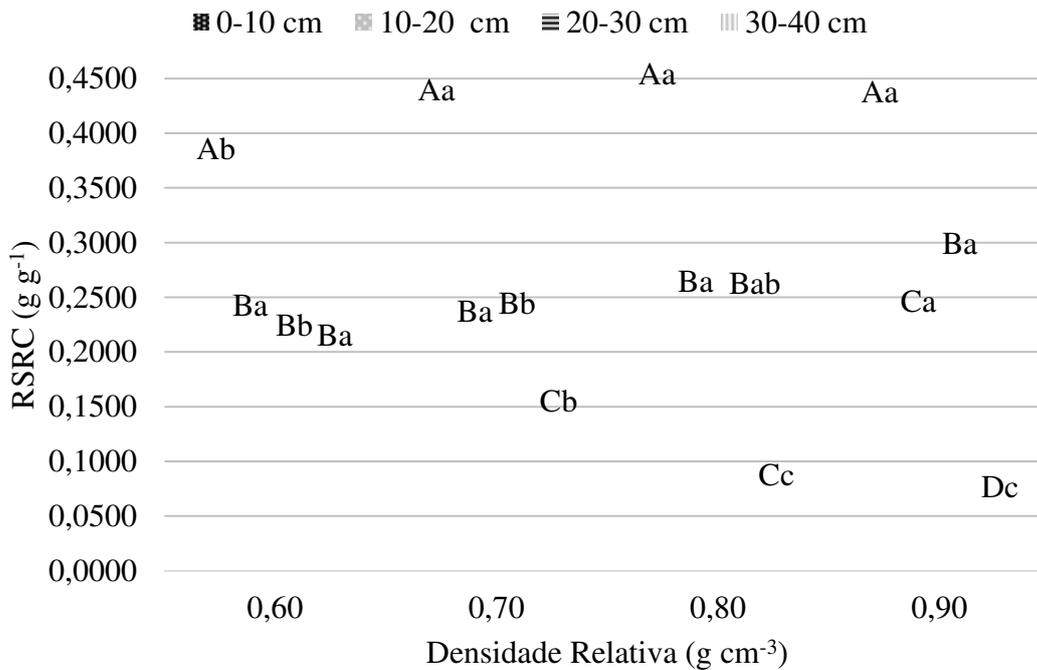
Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

O uso eficiente da água do cafeeiro diminuiu com o aumento do GC na subsuperfície com variação acentuada na CC, porém, com pouca variação no DH. O solo com 60% GC aumentou o uso eficiente da água em 104% e 147% no DH e na CC, respectivamente, em comparação com os 90% GC. A CC aumentou, em média, 232% o uso eficiente da água em relação ao DH. O cafeeiro na melhor condição, CC e 60% GC, aumentou em 595% a eficiência do uso água, em comparação com a pior condição, DH e 90% GC (FIG. 3C).

A taxa de crescimento absoluto do cafeeiro apresentou baixa variação entre os GC e alta entre as umidades do solo. O 90% GC diminuiu em 20% e 11% a taxa de crescimento absoluto no DH e na CC, respectivamente, em comparação com o 60% GC. A CC aumentou a taxa de crescimento absoluto, em média, 140% em relação ao DH (FIG. 3D). A razão peso radicular do cafeeiro foi um pouco maior na CC, cerca de 9%, em relação ao DH (TAB. 2).

A razão sistema radicular do cafeeiro por camada de solo (RSRC) apresentou interação entre o grau de compactação e a profundidade no perfil do solo para a condição de CC, mas não para a condição de DH. No 60% GC, as camadas 2, 3 e 4 apresentaram RSRC iguais e a 1ª camada foi maior do que as demais. Para os demais GC, à medida que aumentou a compactação da última camada de solo diminuiu o RSRC nessa camada e aumenta as demais, principalmente a terceira camada (FIG. 4).

Figura 4 - Razão sistema radicular do cafeeiro por camada de solo (RSRC) do *Coffea arabica* L. (Rubi MG-1192) em diferentes densidades relativa do solo (graus de compactação), na profundidade de 30 a 40 cm, sob diferentes profundidades do solo. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula dentro de cada densidade relativa e minúscula dentro de cada profundidade não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.



4 - DISCUSSÃO

A taxa fotossintética foi sempre maior em cafeeiro cultivado sob CC, independente do GC, comparado com o DH. A maior lâmina de irrigação (1,2 mm dia⁻¹) proporcionou maior taxa fotossintética para o cafeeiro em relação às lâminas menores (GARCIA et al., 2019). O cafeeiro sob DH diminuiu a taxa fotossintética (TESFAYE et al., 2014) associada ao menor uso de energia fotoquímica e aos aumentos na dissipação de energia na forma de fluorescência e de calor. Isso indica ineficiência na síntese de ATP e NADPH pelo decréscimo do aproveitamento da energia luminosa e pelo transporte de elétrons (PELOSO et al., 2017).

A taxa fotossintética está relacionada ao consumo de CO₂ e à concentração de CO₂ na câmara subestomática. Uma planta com alta taxa fotossintética requer um maior consumo de CO₂. Em contrapartida, a concentração interna de CO₂ do mesófilo foliar é inversamente proporcional ao consumo de CO₂ (GALON et al., 2010). No caso de estresse

abiótico, o DH diminui a taxa fotossintética reduzindo o consumo de CO₂, aumentando a concentração de CO₂ na câmara subestomática.

A relação entre o carbono interno e o carbono atmosférico diminui com o consumo de CO₂, pois o consumo de CO₂ aumenta a diferença no seu gradiente entre o ambiente externo e interno da folha. Em função deste gradiente, o CO₂ entrará mais rápido na folha através da abertura estomática (SILVEIRA et al., 2012). As reações de fixação de carbono são constatadas ineficientes quando a relação carbono interno e carbono atmosférico aproxima-se de 1 (GUERRA; COSTA; TAVARES, et al., 2017). Com essa informação constata-se que o cafeeiro sob déficit hídrico foi ineficiente na fixação de carbono em relação à CC.

A condutância estomática não teve diferença quanto à umidade do solo, porém, o normal seria a sua diminuição sob menor disponibilidade de água (PELOSO et al., 2017). O fechamento estomático leva à redução da condutância estomática (SCALON et al., 2011). A planta assimila CO₂ da atmosfera através dos estômatos para usar na fotossíntese, porém, a água é perdida ao expor essa abertura. A entrada de CO₂ e a saída de água ocorrem pelo mesmo orifício e, assim, cria-se um conflito entre a necessidade da planta de conservar água e de absorver CO₂. Abertura e fechamento estomático estão entre as adaptações das plantas para controlar a perda de água pelas folhas (TAIZ et al., 2017).

As umidades do solo foram constantes no cultivo do cafeeiro e, com isso, o cafeeiro sofreu adaptações a essas condições. A planta manteve a abertura estomática e a temperatura foliar, mesmo sob DH, tentando conservar a entrada de CO₂ e evitar uma menor taxa fotossintética para o seu crescimento. Consequentemente, a taxa transpiratória aumentou e a eficiência no uso da água diminuiu. Na condição de CC, a alta taxa fotossintética compensa a transpiração proporcionando um acréscimo na eficiência no uso da água pelo cafeeiro. A CC, comparada ao DH, aumentou a eficiência no uso da água (LIU et al., 2016).

A taxa de crescimento absoluto do cafeeiro foi reduzida no cultivo sob menor disponibilidade hídrica, devido aos efeitos negativos das respostas fisiológicas, proporcionando um menor crescimento da planta em relação à CC. A taxa de crescimento relativo do cafeeiro é maior na CC do que no DH (CAVATTE et al., 2012). O cafeeiro diminuiu o crescimento à medida que reduziu a disponibilidade de água no solo (MOREIRA et al., 2018) e tanto o estágio vegetativo quanto o reprodutivo são afetados pelo DH (APARECIDO; ROLIM, 2018). Normalmente, o crescimento da planta sob estresse hídrico é reduzido devido ao seu decréscimo da taxa fotossintética (LIU et al., 2016).

A razão peso radicular é a proporção entre o sistema radicular e o peso total da planta e, assim, quanto maior essa razão, maior o investimento na produção de raízes. A razão peso radicular sob a DH reduziu em relação à CC e os tratamentos irrigados apresentaram maiores concentrações de raízes em relação aos tratamentos não irrigados (SAKAI et al., 2015). A planta, estrategicamente, tenta manter o crescimento radicular para buscar água no solo em situação de DH e, por isso, a diferença da razão peso radicular entre a CC e DH para o cafeeiro foi pequena.

A razão sistema radicular do cafeeiro (RSRC) é a proporção de raízes para cada camada de solo em relação ao total e, com isso, foi possível constatar onde está a maior concentração de raízes. A compactação da subsuperfície do solo teve pouca ou nenhuma interferência na RSRC na condição de DH, pois o cafeeiro sob DH concentrou as raízes na camada de 0 a 30 cm, atingindo irrisoriamente a camada compactada. Na condição de CC, raízes não tiveram impedimento hídrico para seu crescimento e atingiram a camada compactada. Os tratamentos de irrigação proporcionam maior enraizamento no perfil do solo em relação aos tratamentos sem irrigação (SAKAI et al., 2015).

A compactação do solo aumentou o diâmetro da raiz e reduziu o alongamento da raiz, sendo a taxa de alongamento influenciada pela resistência do solo à penetração (POPOVA et al., 2016). A compactação da subsuperfície do solo influenciou a RSRC, principalmente as duas últimas camadas (20 a 30 e 30 a 40 cm); quanto maior o GC, menor foi RSRC na última camada do solo. A razão peso radicular não alterou com os GC, porém, as raízes tiveram concentrações diferentes no perfil do solo de acordo com o GC. Como meio de compensar o menor desenvolvimento nas camadas compactadas, as raízes aumentaram seu desenvolvimento nas camadas menos compactadas (BEUTLER; CENTURION, 2004), ou seja, quando diminuiu a RSRC na última camada, aumentou a RSRC na penúltima camada do solo.

Em geral, as respostas fisiológicas foram afetadas negativamente pelo aumento do GC, que provocou redução na taxa fotossintética do cafeeiro associado à uma redução da raiz na camada compactada. O decréscimo do consumo de CO_2 e da condutância estomática e o acréscimo na concentração interna de CO_2 e na relação carbono interno/carbono atmosférico apoia a menor taxa fotossintética na condição de elevado GC.

A compactação do solo influencia negativamente a fisiologia e o crescimento da planta, devido à redução no comprimento específico de raiz, na proporção de raízes finas e dos vasos do xilema da raiz (ALAMEDA; VILAR, 2012). Níveis severos de compactação diminuiram a taxa fotossintética, a taxa de transpiração e a condutância estomática em relação

a níveis mais baixos e, quando associado a 14 dias de seca no solo, decresceu ainda mais as respostas fisiológicas (GRZESIAK et al., 2016).

As raízes limitadas pela compactação do solo provocam alterações nas respostas fisiológicas das plantas, podendo ser explicadas pela menor capacidade de exploração da raiz, menor absorção de água e nutrientes (ALAMEDA; VILAR, 2012). Elevado GC afeta a distribuição espacial do sistema radicular, a eficiência no uso da água e a taxa de crescimento absoluto do cafeeiro.

As flutuações no rendimento do café no mundo são causadas, principalmente, pelas variações climáticas. O crescimento do cafeeiro é influenciado pelos fatores ambientais, tais como as chuvas reduzidas, e as altas temperaturas são responsáveis pela seca (CHESEREK; GICHIMU, 2012). A interação entre impedimento mecânico no crescimento das raízes e seca do solo é potencialmente negativa no desenvolvimento e rendimento da planta (SUSUKI et al., 2018).

5 - CONCLUSÃO

As respostas fisiológicas do cafeeiro foram afetadas negativamente pela compactação subsuperficial e pelo déficit hídrico solo. A limitação do crescimento das raízes e a falta de água foram as principais causas do decréscimo das respostas fisiológicas. A compactação subsuperficial e o déficit hídrico juntos potencializaram o efeito negativo nas respostas fisiológicas das mudas de café recém plantadas.

6 - AGRADECIMENTO

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

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADI, I.; GHAUR, H. Effects of soil moisture content and tractor wheeling intensity on traffic-induced soil compaction. **Journal of Central European Agriculture**, Croácia, v. 16, n. 4, p. 489-502, 2015.

ALAMEDA, D.; VILLAR, R. Linking root traits to plant physiology and growth in *Fraxinus angustifolia* Vahl. seedlings under soil compaction conditions. **Environmental and Experimental Botany**, Kidlington, v. 79, n. 4, p. 49– 57, out. 2012.

APARECIDO, L. E. O.; ROLIM, G. S. Forecasting of the annual yield of Arabica coffee using water deficiency. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 53, n. 12, p. 1299-1310, dez. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT . NBR 7182: **Solo: ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 1986. 10p.

BEUTER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 581-588, jun. 2004.

CAVATTE, P. C. et al. Functional analysis of the relative growth rate, chemical composition, construction and maintenance costs, and the payback time of *Coffea arabica* L. leaves in response to light and water availability. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, England, v. 63, n. 8, p. 3071–3082, maio 2012.

CHESEREK, J. J.; GICHIMU, B. M. Drought and heat tolerance in coffee: a review. **International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science**, Norcross, v. 2, n. 12, p. 498-501, dez. 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB: **Boletim Café janeiro 2019**. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 06 de maio de 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2a ed. Brasília, DF: Centro Nacional de Pesquisas do Solo; 1997. 212 p.

FERNANDES, A. L. T. et al. Technical and economic viability of drip irrigation of coffee in Araxá, MG. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 3, p. 347-358, jul./set. 2016.

GALON, L. et al. Influence of herbicides on the photosynthetic activity of sugarcane genotypes. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 591-597, 2010.

GARCIA, F. H. S. et al. Análise fisiológica em mudas de cafeeiro com cercosporiose submetida a diferentes lâminas de irrigação. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 45, n. 1, p. 83-88, jan./mar. 2019.

GUERRA, A. M. N. M.; COSTA, A. C. M.; TAVARES, P. R. F. Photosynthetic activity and yield of lettuce grown under shading. **Revista Agropecuária Técnica**, Areia/PB, v. 38, n. 3, p. 125-132, 2017.

GUIMARÃES, P. T. G. et al. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A. C.; GONTIJO, P. T.; ALVAREZ, V. H. (Ed). Comissão de fertilidade do solo do estado de minas gerais. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais; 1999. p.289-302.

GRZESIAK, M. T. et al. Impact of soil compaction stress combined with drought or waterlogging on physiological and biochemical markers in two maize hybrids. **Acta Physiologiae Plantarum**, Heidelberg, v. 38, n. 109, p. 1-15, maio 2016.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION - ICO : **Trade Statistics Tables**. <<http://www.ico.org>>. Acesso em: 06 de maio de 2019.

KAMIMURA, K. M. et al. Load bearing capacity of a Red-Yellow Latosol in a coffee plantation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1457-1465, nov. 2012.

LANNA, G. B. M.; REIS, R. P. Influence of harvest mechanization in economic and financial viability of coffee farming in southern Minas Gerais. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 110-121, 2012.

Liu, X. et al. Effects of deficit irrigation on yield and nutritional quality of Arabica coffee (*Coffea arabica*) under different N rates in dry and hot region of southwest China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 172, p. 1-8, jul. 2016.

MOREIRA, S. D. et al. Inoculation with mycorrhizal fungi on the growth and tolerance to water deficit of coffee plants. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 11, p. 747-752, nov. 2018.

OLIVEIRA, P. R. et al. Physical quality of an oxisol under soybean at different compaction and irrigation levels. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 587-597, mar./abr. 2012.

OLIVEIRA, V. S. et al. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 14, n. 9, p. 914-920, set. 2010.

PALMA, M. A. Z. et al. Soil penetration resistance in coffee plantations cultivated with mechanized and manual systems. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 3, p. 364-370, 2013.

PELOSO, A. F. et al. Photosynthetic limitations in leaves of arabic coffee promoted by the water deficit. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 389-399, 2017.

POPOVA, L. et al. Plant root tortuosity: an indicator of root path formation in soil with different composition and density. **Annals of Botany**, Kidlington, v. 118, n. 4, p. 685-698, out. 2016.

SAKAI, E. et al. *Coffea arabica* (cv Catuaí) production and bean size under different population arrangements and soil water availability. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 1, p. 145-156, jan./fev. 2013.

SAKAI, E. et al. Coffee productivity and root systems in cultivation schemes with different population arrangements and with and without drip irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, Netherlands, v. 148, P. 16-23, jan. 2015.

SANTINATO, F. et al. Economic analysis of harvesting coffee using repeat operations. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 3, p. 402 - 411, 2015.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF : Embrapa, 2018. 356 p.

SCALON, S. P. Q. et al. Water stress in metabolism and initial growth of mutambo (*Guazuma ulmifolia* Lam.) seedlings. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 4, p. 655-662, 2011.

SILVEIRA, D. C. et al. Relationship between the soil water content and root penetration resistance of a Dystrocohesive Yellow Argissol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 659-667, maio/jun. 2010.

SILVEIRA, H. M. et al. Photosynthetic characteristics of cassava cultivars treated with fluazifop-p-butyl and fomesafen. **Revista Agroambiente On-line**, Boa Vista, v. 6, n. 3, p. 222-227, 2012.

SUZUKI, N. et al. Abiotic and biotic stress combinations. **New Phytologist**, Hoboken, v. 203, n. 1, p. 32-43, 2014.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TESFAYE, S. G. et al. Effect of soil drying on rate of stress development, leaf gas exchange and proline accumulation in Robusta coffee (*Coffea canephora* pierre ex froehner) clones. **Experimental Agriculture**, v. 50, n. 3, p. 458-479, jul. 2014.

CONCLUSÃO GERAL

- I. A mesa de tensão construída foi validada positivamente.
- II. Os manejos de cultivo alteram os atributos físicos do solo, sendo necessário o seu monitoramento para evitar a compactação do solo.
- III. A compactação do solo e o déficit hídrico influenciam negativamente o crescimento e as repostas fisiológicas das plantas.
- IV. O déficit hídrico potencializa o efeito negativo da compactação do solo sobre as plantas.