



ARTIGO ORIGINAL

Raphael Leone da Cruz Ferreira¹
Michel Keisuke Sato¹
Sueli Rodrigues^{1*}
Herdjania Veras de Lima¹
Orivan Maria Marques Teixeira²

¹ Universidade Rural da Amazônia (UFRA),
Instituto de Ciências Agrárias (ICA), Av.
Presidente Tancredo Neves, 2.501, 66077-
830, Belém, PA, Brasil

² Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
(Embrapa), Laboratório de Solos, Tv. Dr. Enéas
Pinheiro, s/n, Marco, 66095-903, Belém, PA,
Brasil

*Autor Correspondente:
E-mail: rodsueli@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE

Elaeis guineensis Jacq.
Resistência do solo à penetração
Teste de Proctor
Grau de compactação
Operações mecanizadas

KEYWORDS

Elaeis guineensis Jacq.
Soil penetration resistance
Proctor test
Degree of compaction
Mechanized operations

Tráfego de máquinas agrícolas em cultivo de palma de óleo: implicações na qualidade física do solo

Traffic of agriculture machinery in oil palm cultivation: implications on the physical quality of the soil

RESUMO: Embora a palma de óleo seja cultivada em grande escala e em diferentes tipos de solos no estado do Pará, mudanças nas propriedades físicas do solo nestas áreas não vêm sendo monitoradas. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar a qualidade física de um Latossolo Amarelo cultivado com palma de óleo após 30 anos de implantação. Amostras de solo com estrutura deformada e indeformada foram coletadas nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, na zona de tráfego. O grau de compactação (GC) foi calculado a partir da densidade máxima do solo obtida pelo teste de Proctor e sua resistência à penetração (RP) determinada em amostras equilibradas em dez potenciais matriciais. Influência das mudanças temporais da umidade do solo na RP também foram avaliadas. Os parâmetros GC e RP demonstraram que a área avaliada apresenta compactação. O GC nas duas profundidades ficou acima de 90% sendo mais intenso na camada de 0-20 cm. Porém, quando avaliado pela RP, o estado de compactação foi mais evidente na camada de 20-40 cm e, as variações na umidade do solo ao longo de um ano mostraram que nos meses mais secos o solo apresenta valores limitantes de RP nesta camada. Desta forma, este estudo indica que o crescimento e desenvolvimento da palma de óleo pode estar sendo restringido pela compactação e sobretudo pela elevada resistência à penetração nos meses de menor disponibilidade de água.

ABSTRACT: Although oil palm is cultivated on a large scale and in different soil types in the state of Pará, changes in the soil's physical properties in these areas have not been evaluated. Thus, the objective of this study was to evaluate the physical quality of a Yellow Latosol cultivated with oil palm, 30 years after implantation. Soil samples with disturbed and undisturbed structure were collected at 0-20 and 20-40 cm depths, in the machinery traffic zone. The degree of compaction (DC) was calculated from the maximum soil bulk density obtained by the Proctor test, and soil penetration resistance (PR) was determined in soil samples equilibrated in ten matric potentials. Temporal changes in soil moisture in PR were also evaluated. Both parameters showed that the evaluated area has an indication of compaction. The DC in both depths was above 90% and was more severe in the 0-20 cm layer. However, when evaluated by PR, the compaction was more evident in the 20-40 cm layer. Variations in soil moisture over a year showed that in the drier months, the soil showed high values of PR in this layer. Thus, this study indicates that the growth and development of oil palm may be restricted by the soil's compaction and mainly by the high penetration resistance in the months of reduced water availability.

1 Introdução

A palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) é a cultura de óleo mais importante do mundo, contribuindo com quase 30% do óleo vegetal comestível utilizado (Hansen et al., 2015). A grande demanda pelo óleo culminou com a expansão do cultivo da palma em todo o mundo. Apesar de a Ásia possuir a maior produção, a redução da disponibilidade de áreas aptas faz com que a expansão, para atender a demanda, se dê para outras regiões, incluindo a América Central e do Sul, que dispõem de áreas com grande potencial de produção (Rhebergen et al., 2016).

Na América do Sul, o Brasil é um importante fornecedor de óleo de palma, e tem o estado do Pará como maior produtor, onde se concentram mais de 80% da área plantada e com potencial de crescimento (Sato et al., 2017). No polo de produção, que abrange a região nordeste do estado, o cultivo ocupa extensas áreas e a alta produtividade torna o sistema de produção mais dependente do uso de máquinas agrícolas para otimizar as operações de preparo da área, tratos culturais e colheita. Entretanto, operações mecanizadas podem contribuir para a degradação das propriedades físicas do solo, como o aumento da compactação, levando a efeitos prejudiciais no desenvolvimento radicular (Colombi et al., 2018) e na produtividade das culturas (Zuraidah et al., 2015).

A compactação do solo é caracterizada pela diminuição da porosidade devido a aplicação de forças externas, causando aumento da densidade e alta resistência à penetração das raízes. Esta condição influencia no armazenamento de água e sua disponibilidade para as plantas, bem como sua condutividade hidráulica, afetando o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular (Shah et al., 2017). Devido ao longo período produtivo da palma de óleo, com uma vida útil por volta de 25 anos (Woittiez et al., 2017), bem como a ausência de preparo da área durante o processo de renovação do plantio, a intensidade do efeito do tráfego de máquinas é acumulada ao longo dos anos.

Para que os efeitos da compactação sejam minimizados, é fundamental que as atividades agrícolas sejam realizadas na faixa de umidade do solo abaixo do limite de plasticidade, o que caracteriza seu estado de friabilidade. Abaixo desse limite o efeito lubrificante da água entre as partículas do solo é reduzido, ocasionando a coesão das partículas, aumentando a pressão exercida pelo sistema radicular para crescer, podendo alcançar limites considerados críticos (Suzuki et al., 2013).

Na avaliação dos impactos do uso e manejo na qualidade física do solo, o grau de compactação (GC) é utilizado para determinar a susceptibilidade de um solo à compactação, obtida pelo teste de Proctor (Håkansson, 1990; Oliveira et al., 2016). Além do GC, a resistência à penetração (RP) também é um atributo indicado para a avaliação da condição física do solo, devido sua relação direta com o crescimento das plantas (Suzuki et al., 2013). Além disso, a RP é um indicador de qualidade do solo dinâmico que varia tanto por alterações na estrutura quanto na disponibilidade de água no solo. Essa disponibilidade hídrica varia ao longo do ano podendo causar restrições ao crescimento radicular em determinados períodos, principalmente naqueles mais secos.

Embora a palma de óleo seja cultivada em grande escala e em diferentes tipos de solos no estado do Pará, mudanças nas propriedades físicas nestas áreas não vêm sendo monitoradas

a fim de avaliar a adequabilidade dos sistemas de manejo adotados. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar a qualidade física de um Latossolo Amarelo cultivado com palma de óleo após 30 anos de implantação. Os objetivos específicos foram: (i) determinar a densidade máxima do solo e calcular seu grau de compactação; (ii) determinar a curva de resistência à penetração; e (iii) avaliar as mudanças temporais na umidade e resistência do solo à penetração na zona de tráfego.

2 Material e Métodos

O estudo foi realizado em uma fazenda comercial localizada no município de Tailândia, região nordeste do estado do Pará (2°28'49" S; 48°46'37" W), a uma altitude de 35 m acima do nível do mar, sem variações altimétricas expressivas. De acordo com a classificação de Köppen o clima é do tipo Afi (tropical úmido) com precipitação média anual de 2837 mm (Alvares et al., 2014), distribuídos em um período chuvoso (janeiro a julho) com máxima de 521,8 mm no mês de fevereiro, e período seco (agosto a dezembro) com mínima de 11,8 mm no mês de setembro.

O solo da área assim como a classe textural foram classificados de acordo com Santos et al. (2013). O solo é um Latossolo Amarelo distrófico com classe textural franco-argilo-arenosa na camada de 0-20 cm (243 g kg⁻¹ de argila) e argilo-arenosa (367 g kg⁻¹ de argila) na camada de 20-40 cm. Os conteúdos de matéria orgânica nas camadas de 0-20 e 20-40 foram de 12,6 g kg⁻¹ e 9,61 g kg⁻¹, respectivamente. A determinação da distribuição do tamanho das partículas e o conteúdo de matéria orgânica seguiram as metodologias propostas por Gee e Bauder (1986) e Walkley e Black (1934), respectivamente.

A área plantada tem 34 ha e vem sendo cultivada com palma de óleo há 30 anos sob sistema de manejo convencional. Em 1984 foi iniciado o primeiro ciclo de cultivo com a derrubada da vegetação nativa, preparo da área com aração e gradagem e plantio da palma de óleo em espaçamento triangular de 9 x 9 x 9 m. A renovação do plantio ocorreu em 2010, sem o preparo da área, com abertura de covas entre as plantas seguindo as linhas de plantio do cultivo anterior.

As atividades periódicas de adubação (duas por ano), controle de invasoras (três por ano) e colheita dos frutos (15 em 15 dias a partir do terceiro ano do plantio) são realizadas com trator Agrale 4230.4 (potência máxima de 30 CV), com pneus diagonais dianteiros e traseiros com pressão interna de 0,30 MPa (44 lb in⁻²) e 0,17 MPa (24 lb in⁻²), respectivamente. O trator, com massa de 2.318 kg, foi acoplado a uma carreta de 830 kg e capacidade de carga de 4.000 kg para colheita e adubação, ou a um tanque pulverizador com massa de 1.000 kg e capacidade de 2.000 L para controle de invasoras.

Amostras de solo com estrutura deformada e indeformada (utilizando anéis volumétricos com 5 cm de altura e diâmetro) foram coletadas em 30 pontos distribuídos uniformemente na área, na zona de tráfego de máquinas, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, totalizando 120 amostras (60 deformadas e 60 indeformadas). Ademais, foi realizado o monitoramento mensal da umidade do solo, no período de um ano, entre os meses de fevereiro de 2013 a janeiro de 2014.

As curvas de compactação do solo, para as duas profundidades, foram determinadas utilizando amostras compostas, e foram

obtidas pelo ensaio de Proctor normal 560 kPa, padronizado pela NBR 7182 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986), sem reuso do material. A densidade relativa ou grau de compactação do solo (GC) foi calculada de acordo com Håkansson (1990) pela relação:

$$GC = \left(\frac{D_s}{D_{s_{\max}}} \right) \times 100 \quad (1)$$

sendo GC o grau de compactação (%); D_s a densidade do solo aparente (Mg m^{-3}); e $D_{s_{\max}}$ a densidade do solo máxima obtida pelo teste de Proctor (Mg m^{-3}).

As amostras indeformadas foram saturadas em bandejas por 48 horas e, para cada profundidade, divididas em grupos de três amostras que foram submetidas à dez potenciais matriciais (ψ): -0,003, -0,006, -0,01, -0,03, -0,06, -0,1, -0,3, -0,6, -1, -1,5 MPa utilizando câmaras de pressão de Richards (Klute, 1986). Ao atingir o equilíbrio hídrico em cada ψ , as amostras foram pesadas para determinação da massa úmida e, em seguida, determinada a resistência do solo à penetração (RP) utilizando um penetrômetro eletrônico de bancada com haste de penetração com ponta cônica de 4 mm e semiângulo de 30°, com deslocamento vertical da haste a uma velocidade constante de 0,01 m min^{-1} e capacidade de registro de uma leitura por segundo. Foi calculada uma média dos valores registrados desprezando as cinco primeiras e últimas leituras. Após a determinação da RP as amostras foram secas em estufa a 105°C por 24h para determinação da massa seca do solo e cálculo da umidade (θ) em cada ψ . A densidade do solo (D_s) foi determinada pela relação entre a massa do solo seco e o volume do anel (Blake & Hartge, 1986).

A fim de incorporar o efeito da θ e D_s no valor de RP, foi realizado o ajuste dos dados utilizando a forma linearizada do modelo proposto por Busscher (1990):

$$\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln D_s \quad (2)$$

em que RP é a resistência do solo à penetração (MPa); θ o conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); D_s a densidade do solo (Mg m^{-3}); a , b e c os parâmetros de ajuste do modelo.

Para avaliar a influência da variação temporal de água no solo na RP, foi realizado o monitoramento mensal da umidade do solo pelo método da umidade gravimétrica (Gardner, 1986) nos mesmos pontos de coleta das amostras, no período de fevereiro de 2013 a janeiro de 2014. A umidade gravimétrica foi convertida em umidade volumétrica (θ) multiplicando a primeira pela densidade do solo (D_s).

Utilizando os parâmetros de ajuste da curva de resistência do solo à penetração, para cada valor mensal de umidade foi determinada a respectiva RP, a fim de calcular a variação temporal desse atributo no solo.

A adequação dos dados aos modelos da curva de compactação do solo e da resistência à penetração, foi avaliada pela análise de variância da regressão ($p < 0,05$) e pelo coeficiente de determinação (R^2). O grau de compactação nas duas profundidades foi comparado pelo teste t ($p < 0,05$), utilizando o programa estatístico R (R Development Core Team, 2011).

3 Resultados e Discussão

A relação entre a densidade (D_s) e o conteúdo de água no solo (θ) obtida pelo teste de Proctor e que representa a curva de compactação do solo está apresentada na Figura 1. O modelo quadrático usado para o ajuste dos dados foi altamente significativo para todos os parâmetros ($p < 0,0001$) e com coeficiente de determinação $> 0,86$. A efetividade deste ajuste tem sido verificada por outros autores (Betoli Júnior *et al.*, 2012).

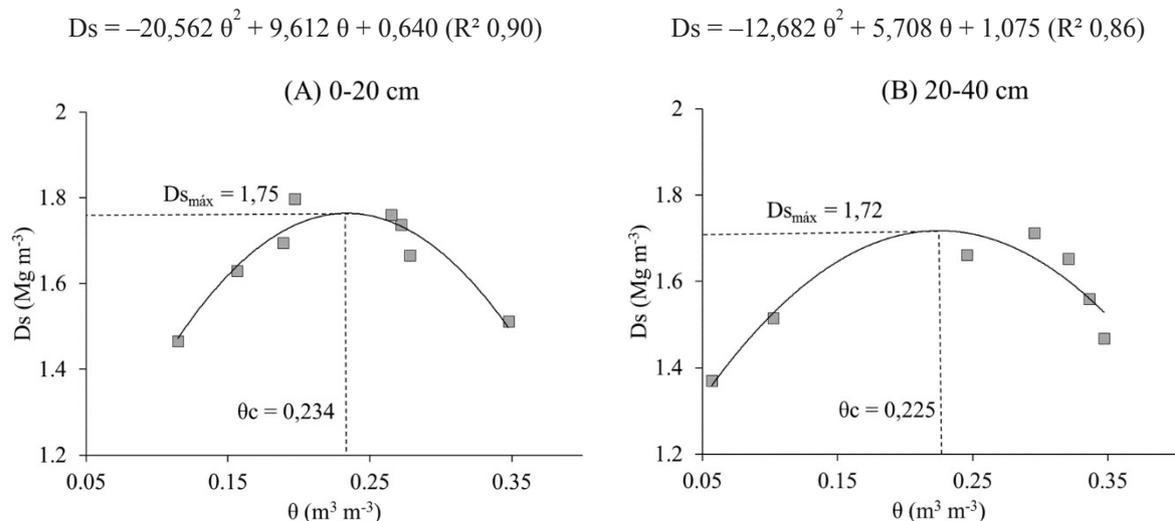


Figura 1. Curva de compactação do solo nas camadas de 0-20 (A) e 20-40 (B) cm na zona de tráfego em área cultivada com palma de óleo no município de Tailândia (PA). D_s = densidade do solo; θ = conteúdo volumétrico de água no solo; $D_{s_{\max}}$ = densidade do solo máxima; θ_c = umidade crítica para compactação

Figure 1. Soil compaction curve in the 0-20 (A) and 20-40 (B) cm layers, on traffic zone in an oil palm area in the municipality of Tailândia (PA, Brazil). D_s = soil bulk density; θ = volumetric water content; $D_{s_{\max}}$ = maximum soil bulk density; θ_c = critical moisture for soil compaction

As variáveis $D_{s_{\max}}$ e θ_c são influenciadas pelo conteúdo de argila e matéria orgânica (MO) no solo (Oliveira *et al.*, 2016). Porém, apesar do aumento de quase 10% no conteúdo de argila da camada de 0-20 para a de 20-40 cm, os valores de densidade do solo máxima ($D_{s_{\max}}$) e umidade crítica para compactação (θ_c) pouco variaram entre as duas profundidades. Assim, apesar da camada de 20-40 cm ter um maior conteúdo de argila, fator que reduziria a $D_{s_{\max}}$, o maior teor de MO na camada superficial (0-20 cm) provavelmente contribuiu em reduzir a diferença nos valores da curva de compactação do solo. Como apontado por Betioli Júnior *et al.* (2012), os diferentes estudos que utilizaram solos com texturas similares, apresentaram valores equivalentes de $D_{s_{\max}}$ pelo teste de Proctor. Portanto, o teste é adequado para obter valores de referência para $D_{s_{\max}}$ que podem ser utilizados para fins de manejo do solo e monitoramento da qualidade física do solo.

A θ_c correspondente a $D_{s_{\max}}$ equivale a 98 e 83% do conteúdo de água no solo na sua capacidade de campo na camada de 0-20 cm ($0,24 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e 20-40 cm ($0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), respectivamente, e representa uma condição em que o tráfego de máquinas na área deve ser evitado. A compressão do solo sob uma umidade inadequada aumenta sua susceptibilidade à compactação por reduzir a resistência interna do solo e facilitar o processo de deformação (Shah *et al.*, 2017). Portanto, destaca-se que a condição inadequada de umidade do solo para o tráfego de máquinas, na camada de 0-20 cm é praticamente a mesma que a sua umidade na capacidade de campo, caracterizada pela condição em que, após a livre drenagem da água no perfil do solo, os poros maiores estão preenchidos com ar e a água fica retida nos poros menores e, neste estado, os conteúdos de água e ar do solo são considerados ideais para o crescimento das culturas.

Os valores médios de grau de compactação (GC) calculados a partir dos valores de D_s obtidos em campo e da $D_{s_{\max}}$ estão apresentados na Tabela 1. O GC é um parâmetro efetivo para avaliar a compactação do solo uma vez que permite a comparação de resultados de densidade entre solos que apresentam diferentes características mineralógicas, de textura e de matéria orgânica (Håkansson, 1990).

Tabela 1. Estatística descritiva do grau de compactação (GC) na zona de tráfego de um Latossolo Amarelo distrófico cultivado com palma de óleo, no município de Tailândia (PA)

Table 1. Descriptive statistics of the degree of compaction (GC) in the traffic zone of a dystrophic Yellow Latosol cultivated with oil palm, in the municipality of Tailândia (PA, Brazil)

Camada (cm)	N	Média (%)	CV (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)
0-20	30	95,00 a	4,39	83,88	100,00
20-40	30	90,00 b	4,32	81,61	97,85

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste t a 5 %. CV % = coeficiente de variação.

O GC na zona de tráfego variou de 83,9 a 100% na camada de 0-20 cm e de 81,6 a 97,9% em 20-40 cm. No entanto, na primeira camada dos 30 pontos avaliados 57% ficaram acima do valor médio, enquanto que na segunda 50% das

amostras foram acima da média de 90,25%, e somente duas superaram a média da camada superior de 95%, evidenciando que o efeito acumulado da pressão causada pelo tráfego de máquinas se deu principalmente na superfície.

Estudos têm sugerido valores de GC ótimos e críticos para o desenvolvimento das culturas, no entanto, a maioria dos estudos avaliaram culturas anuais, tais como a soja (Oliveira *et al.*, 2016). Com base nos valores de GC sugeridos na literatura (77-90 %) os resultados evidenciam que há limitações físicas para o crescimento e desenvolvimento normal das plantas na área avaliada, na profundidade de 0-40 cm. Esta evidência de compactação do solo demonstra a necessidade de que cuidados devem ser tomados para não haver uma maior degradação da qualidade física desse solo, sobretudo na área onde ocorre o tráfego de maquinários. De fato, Sato *et al.* (2017) identificou, na zona de tráfego de área cultivada com palma e óleo, uma degradação da qualidade física do solo, avaliada pelo intervalo hídrico ótimo. Uma redução significativa na biomassa da planta, devido à compactação do solo, foi relatada por Zuraidah *et al.* (2017) em área de cultivo de palma de óleo na Malásia.

Além do GC, o estado de compactação do solo também foi avaliado pela resistência do solo à penetração (RP). Para tanto, primeiramente foi determinada a curva de resistência do solo à penetração nas duas profundidades. A análise dos resíduos dos dados de RP apresentou distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($p > 0,1$) e, o modelo não linear proposto por Busscher (1990) para o ajuste das curvas explicou 85 e 74% da variabilidade dos dados de RP nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, respectivamente. Os valores de F confirmam que o modelo foi apropriado para a distribuição dos dados (Tabela 2). A significância das variáveis θ e D_s nos valores de RP foi demonstrada pelo teste t. O sinal negativo no parâmetro b comprova a relação negativa entre θ e a RP, enquanto que o sinal positivo no parâmetro c evidencia que a RP é diretamente proporcional a D_s . Este comportamento é confirmado e discutido por diversos autores (Passos *et al.*, 2017; Sato *et al.*, 2015). O maior valor absoluto de t para o parâmetro b nas duas camadas sugere que as variações da RP são mais influenciadas pela θ em comparação a D_s .

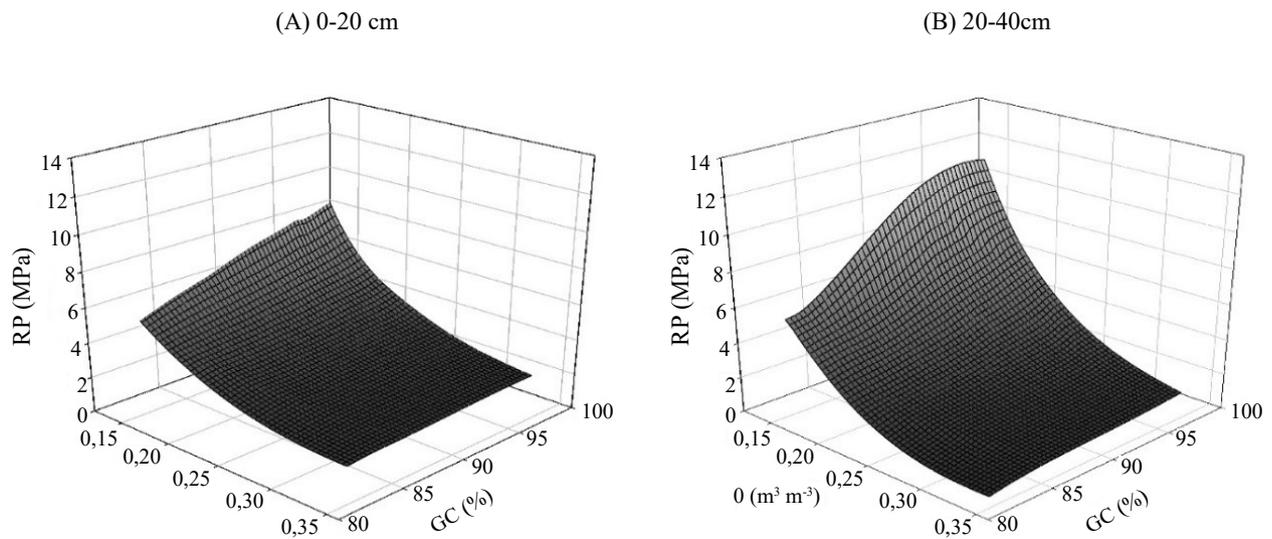
O efeito direto da D_s está relacionado com a redução do espaço poroso que aumenta a força de atrito por ocasião da penetração das raízes. Em relação a θ , o efeito lubrificante da água é reduzido com o secamento do solo promovendo maior atrito das partículas, dificultando a penetração das raízes e aumentando a RP (Shah *et al.*, 2017).

Na camada de 0-20 cm a RP variou de 0,63 MPa ($\theta=0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) com GC de 84% a 7,44 MPa ($\theta = 0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e GC = 98% (Figura 2). Na camada subsequente a menor RP de 0,65 MPa ($\theta = 0,65 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) correspondeu a um GC de 86% enquanto a RP máxima de 10,81 MPa ($\theta = 0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) esteve associada a um GC de 93%. O menor teor de argila e maior de MO na camada superficial podem contribuir para a redução dos valores de RP na curva, quando comparados a camada de 20-40 cm, mesmo com menor θ , maior GC e densidade na camada superficial (Oliveira *et al.*, 2016), desta forma o incremento do teor de argila na camada de 20-40 cm intensificou o processo de compactação do solo, promovendo altos valores de resistência à penetração (Sato *et al.*, 2015).

Tabela 2. Coeficientes de regressão para a curva de resistência do solo à penetração ($\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln Ds$). RP é a resistência do solo à penetração (MPa); Ds é a densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$), e θ é o conteúdo volumétrico de água do solo ($m^3\ m^{-3}$)**Table 2.** Regression coefficients for the soil penetration resistance curve ($\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln Ds$). RP is the soil penetration resistance (MPa); Ds is the soil bulk density ($Mg\ m^{-3}$), and θ is the volumetric soil water content ($m^3\ m^{-3}$)

Camada (cm)	Parâmetro	Valor	t	P-valor	F	R ²
0–20	a	0,0278	-11,0495	8,5E-16	165,37**	0,85
	b	-1,9202	-16,7416	1,1E-23		
	c	2,7617	4,5972	2,4E-05		
20–40	a	0,0042	-8,0694	5,3E-11	82,81**	0,74
	b	-3,0305	-12,5782	4,4E-18		
	c	4,4975	3,5431	8,0E-04		

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

**Figura 2.** Curva de resistência do solo à penetração (RP) em função da umidade volumétrica (θ) e grau de compactação (GC), nas camadas de 0–20 (A) e 20–40 cm (B) na zona de tráfego de área cultivada com palma de óleo no município de Tailândia (PA)**Figure 2.** Soil penetration resistance curve (RP) as a function of volumetric moisture (θ) and degree of compaction (GC), in the 0-20 (A) and 20-40 cm (B) layers on traffic zone of a cultivated area with oil palm in the municipality of Tailândia (PA, Brazil)

Considerando a θ na capacidade de campo ($CC = 0,24$ e $0,27\ m^3\ m^{-3}$ para as camadas 0-20 e 20-40 cm, respectivamente), bem como os valores de GC médios para as duas camadas (Tabela 1), e o valor de 3,5 MPa como crítico à RP (Tormena *et al.*, 2007), observa-se que esta não foi um fator limitante ao crescimento radicular das culturas. Entretanto, quando a θ é reduzida a 30% da CC, há um aumento na RP de 1,67 para 3,32 MPa na camada de 0-20 cm e de 1,77 para 5,22 MPa na de 20-40 cm, sugerindo que nessas condições, o crescimento radicular da palma de óleo estaria sob maiores restrições.

Esses resultados indicam que o crescimento da palma de óleo pode estar sendo restringido por ocasião da variação temporal da água no solo. Isso porque a umidade é um atributo extremamente sensível às variações sazonais.

A variação temporal do conteúdo de água no solo e de resistência à penetração por ocasião da variação de umidade ao longo dos 12 meses está representada na Figura 3. Como esperado, no período que compreendeu os meses de janeiro a julho a alta disponibilidade hídrica do solo favoreceu a manutenção da RP abaixo do limite crítico, sendo justificado

pelo efeito lubrificante da água, reduzindo a coesão das partículas do solo (Shah *et al.*, 2017).

A redução no conteúdo de água no período de agosto a dezembro contribuiu para o aumento da RP acima do considerado crítico (3,5 MPa) ao crescimento radicular da maioria das culturas (Tormena *et al.*, 2007) nas duas camadas. Sato *et al.* (2015) trabalhando com Latossolo em diferentes classes texturais, relatou que o incremento no teor de argila promoveu maiores valores de RP, o que explica o comportamento mais acentuado da RP na camada de 20-40 cm nos meses de agosto a dezembro.

Os maiores valores RP na camada de 20-40 cm, no período seco (após julho) (Figura 3B), é um indicativo da presença de uma camada mais compactada nesta profundidade, que não é observada no período chuvoso em virtude da umidade do solo se manter relativamente alta ($> 0,20\ m^3\ m^{-3}$) neste período. A alta RP do solo em determinada época do ano aponta que o solo avaliado apresenta uma baixa resistência às forças de compressão, e exigiria algum tipo de revolvimento ou outro manejo do solo para manter a estrutura do solo adequada.

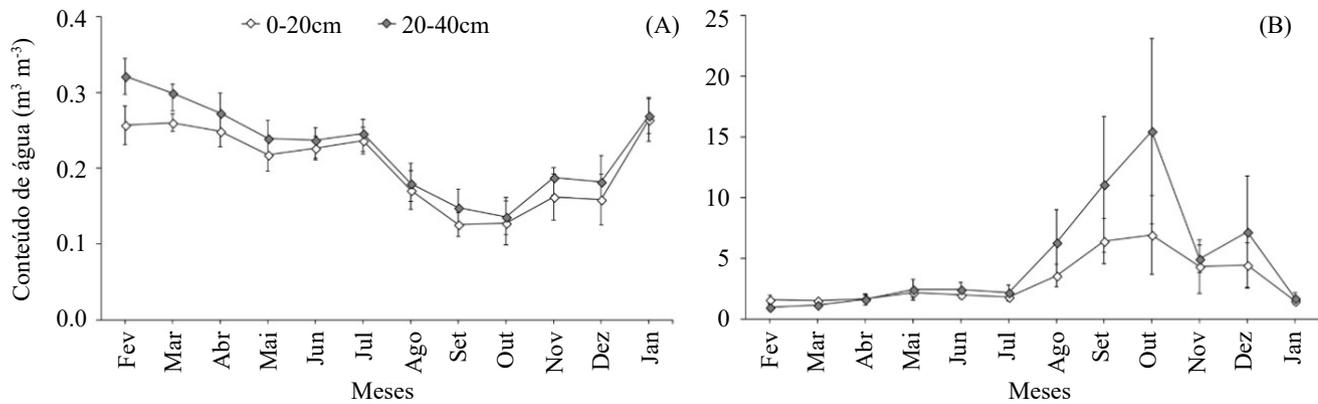


Figura 3. Variação temporal do conteúdo de água no solo (A) e da resistência à penetração (B), em duas profundidades (0-20 e 20-40 cm), na zona de tráfego em área cultivada com palma de óleo durante os meses de fevereiro de 2013 a janeiro de 2014. Barra representa o desvio padrão da média

Figure 3. Time variation of soil water content (A) and penetration resistance (B), in two depths (0-20 and 20-40 cm), at the traffic zone in an area cultivated with oil palm from February 2013 to January 2014. Bars represent the standard deviation of the mean

Na prática, nenhum manejo de revolvimento do solo é realizado nas entrelinhas das plantas de palma de óleo. O que se faz, é o cultivo da leguminosa puerária (*Pueraria phaseoloides*) para manutenção da cobertura vegetal e fixação de nitrogênio. No entanto, é comum estas se encontrarem com o desenvolvimento bastante comprometido, principalmente na zona de tráfego de máquinas, visto que seu cultivo é realizado somente no período de implantação da cultura e, com o crescimento da palma de óleo ocorre o sombreamento da entrelinha e consequente morte da puerária.

Embora a palma de óleo seja cultivada em diferentes tipos de solos, variações nas propriedades físicas e químicas podem causar diferenças significativas na produção (Woittiez *et al.*, 2017). Avaliando a qualidade física do solo na mesma área estudada, Sato *et al.* (2017) destacou que o estresse hídrico nas profundidades de 20 a 60 cm forneceu evidências de que a variação temporal do conteúdo de água influencia na produtividade da palma de óleo.

Apesar da constatação de compactação na zona de tráfego ter sido um resultado esperado, o objetivo dos resultados apresentados foi identificar qual o nível de comprometimento da qualidade física a fim de advertir de que as práticas de manejo em área de palma de óleo afetam negativamente as propriedades físicas do solo, o que foi comprovado pelo fato de que, na média, a densidade da camada superficial está cerca de 90% da densidade máxima para este solo. Portanto, os resultados aqui demonstrados podem orientar para o manejo mais adequado do solo.

4 Conclusões

Os parâmetros grau de compactação (GC) e resistência do solo à penetração (RP) demonstraram que a área avaliada apresenta compactação nas duas profundidades. Assim, este estudo indica que o crescimento e desenvolvimento da palma de óleo pode estar sendo restringido pela compactação e sobretudo pela elevada resistência à penetração nos meses de menor disponibilidade de água.

Referências

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 7182*: Solo: Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 11 p.
- BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um latossolo vermelho após 30 anos sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 971-982, 2012.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America: American Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.
- BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *American Society of Agricultural Engineers*, Saint Joseph, v. 33, n. 2, p. 519-524, 1990.
- COLOMBI, T.; TORRES, L. C.; WALTER, A.; KELLER, T. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth: a vicious circle. *Science of the Total Environment*, Amsterdam, v. 626, n. 1, p. 1026-1035, 2018.
- GARDNER, W. H. Water content. In: KLUTE, A. (ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 493-541.
- GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 383-411.
- HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 16, n. 2, p. 105-120, 1990.
- HANSEN, S. B.; PADFIELD, R.; SYAYUTI, K.; EVERS, S.; ZAKARIAH, Z. MASTURA, S. Trends in global palm oil

- sustainability research. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v. 100, n. 1, p. 140-149, 2015.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 635-660.
- OLIVEIRA, P. D.; SATO, M. K.; LIMA, H. V.; RODRIGUES, S.; SILVA, A. P. Critical limits of the degree of compactness and soil penetration resistance for the soybean crop in N Brazil. *Journal of Plant Nutrition Soil Science*, Hoboken, v. 179, n. 1, p. 78-87, 2016.
- PASSOS, R. R.; COSTA, L. M.; ASSIS, I. R.; SANTOS, D. A.; RUIZ, H. A.; GUIMARÃES, L. A. O. P.; ANDRADE, F. V. Least limiting water range of Udox soil under degraded pastures on different sun-exposed faces. *Institute of Agrophysics*, Lublin, v. 31, n. 3, p. 393-400, 2017.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2011.
- RHEBERGEN, T.; FAIRHURST, T.; ZINGORE, S.; FISHER M.; OBERTHÜR, T.; WHITBREAD, A. Climate, soil and land-use based land suitability evaluation for oil palm production in Ghana. *European Journal of Agronomy*, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 1-14, 2016.
- SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 6. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. 100 p.
- SATO, M. K.; LIMA, H. V.; DE OLIVEIRA, P. D.; RODRIGUES, S. Critical soil bulk density for soybean growth in Oxisols. *Institute of Agrophysics*, Lublin, v. 29, n. 4, p. 441-447, 2015.
- SATO, M. K.; LIMA, H. V.; FERREIRA, R. L. C.; RODRIGUES, S.; SILVA, A. P. Least limiting water range for oil palm production in Amazon region, Brazil. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 74, n. 2, p. 148-156, 2017.
- SHAH, A. N.; TANVEER, M.; SHAHZAD, B.; YANG, G.; FAHAD, S.; ALI, S.; BUKHARI, M. A.; TUNG, S. A.; HAFEEZ, A.; SOULIYANONH, B. Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, Basel, v. 24, n. 11, p. 10056-10067, 2017.
- SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. *Soil Research*, Clayton South, v. 51, n. 4, p. 311-321, 2013.
- TORMENA, C. A.; ARAUJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 211-219, 2007.
- WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff Method for determining soil organic matter and a proposed modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science*, Alphen aan den Rijn, v. 37, n. 3, p. 29-38, 1934.
- WOITTIEZ, L. S.; VAN WIJK, M. T.; SLINGERLAND, M.; VAN NOORDWIJK, M.; GILLER, K. E. Yield gaps in oil palm: a quantitative review of contributing factors. *European Journal of Agronomy*, Amsterdam, v. 83, n. 1, p. 57-77, 2017.
- ZURAI DAH, Y.; HANIFF, M. H.; ZULKIFLI, H. Does soil compaction affect oil palm standing biomass? *Journal of Oil Palm Research*, Kajang, v. 29, n. 3, p. 352-357, 2017.
- ZURAI DAH, Y.; ZULKIFLI, H.; HANIFF, M. H.; NUR ZUHAILI, H. A. Z. A.; NORDIANA, A. A.; SHUIB, A. R.; AFIFAH, A. R.; NUR MAISARAH, J. Alterations of soil physical properties due to mechanization activities under oil palm on Bernam Series soil. *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, Bhopal, v. 3, n. 5, p. 1435-1446, 2015.

Contribuição dos Autores: Raphael Leone da Cruz Ferreira, conduziu o experimento, fez a revisão bibliográfica, realizou a análise de dados e a escrita científica; Michel Keisuke Sato, ajudou na condução do experimento, planejamento e escrita científica; Sueli Rodrigues, ajudou na elaboração de gráficos e tabelas, escrita científica e correções do artigo; Herdjanía Veras de Lima, ajudou no planejamento do experimento, na orientação do trabalho realizado, na revisão bibliográfica e correções do manuscrito; Orivan Maria Marques Teixeira, realizou todas as análises laboratoriais necessárias para produção do artigo.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudo ao primeiro autor, à Embrapa Amazônia Oriental pelo apoio na realização do trabalho e à empresa Agropalma pela concessão da área de estudo.

Fontes de Financiamento: Não houve fonte de financiamento.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.