



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO
PGAGRO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
DEFESA DE TESE**

PEOLA REIS DE SOUZA

**DIAGNÓSTICO, MONITORAMENTO E MITIGAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE
SOLOS CULTIVADOS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

BELÉM/PA

2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO
PGAGRO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
DEFESA DE TESE**

PEOLA REIS DE SOUZA

**DIAGNÓSTICO, MONITORAMENTO E MITIGAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE
SOLOS CULTIVADOS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Defesa de tese apresentado à
Universidade Federal Rural da
Amazônia, como parte das exigências do
Programa de Pós-graduação em
Agronomia, para obtenção do título de
Doutora.

Área de concentração: Agronomia.

Orientadora: Profa. Dra. Herdjanía
Veras de Lima.

BELÉM/PA

2024

PEOLA REIS DE SOUZA

DIAGNÓSTICO, MONITORAMENTO E MITIGAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE SOLOS CULTIVADOS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Defesa de tese apresentada a Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, para a obtenção do título de Doutora.

Apresentado em fevereiro de 2024

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Herdjanía Veras de Lima
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

Documento assinado digitalmente
gov.br SUELI RODRIGUES
Data: 18/03/2024 08:52:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Sueli Rodrigues
Universidade Federal do Piauí - UFPI

Lorena Chagas Torres

Dra. Lorena Torres Chagas
Swedish University of Agricultural Sciences – SLU

Documento assinado digitalmente
gov.br TEOGENES SENNA DE OLIVEIRA
Data: 23/03/2024 17:09:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Teogenes Senna de Oliveira
Universidade Federal de Viçosa – UFV

Documento assinado digitalmente
gov.br MICHEL KEISUKE SATO
Data: 20/03/2024 20:46:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Michel Keisuke Sato
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Pará -IFPA

Aos meus pais, Edina Nogueira Reis e
Orenio Pompeu de Souza Filho e irmãos
Guilber Nogueira Reis e Paula Freitas de
Almeida.

Peola Souza

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder força e guiar meu caminho nessa etapa tão importante da vida;
Aos meus pais, Edina Nogueira Reis e Orenio Pompeo de Souza Filho, pela dedicação, carinho e amor, mesmo estando longe;
A minha orientadora Profa. Dra. Herdjanira Veras de Lima, pelos ensinamentos e confiança;
Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia (PGAgro);
Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos;
A Empresa Denpasa S/A, Roberto Yokoyama, Gilson, Seu Mário e todos os colaboradores de campo
A Universidade Federal de Viçosa e todos os profissionais do Departamento de Solos, principalmente dos Laboratórios de Matéria Orgânica e Física do solo.
Ao prof. Dr. Teogenes Senna de Oliveira pela parceria, acolhimento e orientação durante a pesquisa na UFV.
A Prof. Dra. Gisele Barata pelos conselhos e apoio a pesquisa;
Ao prof. Dr. Igor Assis pelo acolhimento e ensinamentos no Laboratório de Física do Solo da UFV;
A todos que participaram e ajudaram nas coletas e análises: Adriano Moura, Daihany Callegari, Deborah Pires, João Victor Pinto, Yan Nunes, Pedro, Flávio, Italo, Dandara e todos os colegas da sala da pós, pela amizade e companheirismo;
A secretária do Programa de Pós-graduação em Agronomia, Neila Sardinha, pelo cuidado, dedicação e amizade.
Aos amigos queridos que me acolheram em Viçosa, Dona Antonia (Ninita) e Tiago.
Aos amigos (Neilson, Jonatas Pedro, Hugo Felipe, Vanessa, Naiara, Cyntia) e pesquisadores que me ajudam na UFV agradeço a parceria, acolhimento e aprendizado.
Aos professores Elaine Lobato, Allan Lobato, Antonia Kilma, Norberto Noronha, Mário Lopes, Antonia Bronze, Vania Melo, Suzana Romeiro.
Aos técnicos da UFRA que me auxiliaram na pesquisa, Seu Amalry, Seu Junior, Júlio e Jeferson;
Aos técnicos da UFV que auxiliaram na pesquisa, Paloma, Cláudio, Adriana, João Milagres e Humberto.
A todos os bolsistas de iniciação científica, Ana Carolina, Inaê Vilhena, Haroldo, Mayane;
A todos da turma de doutorado 2020/1, por todos os momentos de felicidade;
E aos que diretamente ou indiretamente, contribuíram na minha formação acadêmica e realização desta pesquisa.

“Todo grande sonho começa com um sonhador. Lembre-se sempre, você tem dentro de você a força, a paciência e a paixão para alcançar as estrelas para mudar o mundo.”

Harriet Tubman

DIAGNÓSTICO, MONITORAMENTO E MITIGAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE SOLOS CULTIVADOS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

RESUMO

A palma de óleo produz um dos óleos mais demandados do mundo e seu manejo requer operações mecanizadas, do preparo do solo até a colheita dos frutos, que podem levar a compactação do solo. O objetivo geral dessa pesquisa foi analisar propriedades físicas do solo para o diagnóstico e monitoramento, e propor medidas de mitigação da compactação de solos cultivados com palma de óleo no estado do Pará, Amazônia Oriental. O estudo foi conduzido em três replantios com palma de óleo (1999, 2013, 2017), onde foram coletadas amostras de solo em três zonas de manejo (coroamento, linha de plantio e linha de tráfego) próximo a doze plantas em cada área. Durante junho/2021 a julho/2022 foram coletadas mensalmente a umidade do solo, resistência à penetração de raiz (RP) e porosidade de aeração (PA) em todas as áreas e zonas de manejo. Além do monitoramento da produção de cachos de frutos frescos. Os conteúdos de água para os limites de preparo do solo foram estimados através de parâmetros de van Genuchten, e a RP foi ajustada a equações que tinham a umidade e a densidade do solo com variáveis preditoras. Um experimento fatorial de incubação com resíduos da cadeia produtiva da palma de óleo foi conduzido em condições controladas ((4 resíduos (pecíolo, folíolo, engaço-EFB, MIX) x 6 tempos – (0, 0,04, 0,08, 0,12, 0,16, 0,22 e 0,30 ano)) + 1, distribuídos em quatro blocos. Onde o fluxo de emissão de C-CO₂ foi monitorado, além da massa seca remanescente do resíduo (*msR*), nutriente e o tempo de meia vida dos resíduos foram calculados. Outro experimento foi conduzido utilizando o EFB para ensaios uniaxiais em fatorial (2 densidades de solo inicial – BDi x 5 quantidades de EFB em superfície - 0, 20, 40, 60, 80 Mg ha⁻¹), com 4 repetições. Neste ensaio foi ajustada a curva de compressão, e dela foram retiradas a pressão de pré-consolidação e o índice de compressão. Os resultados indicaram que em geral os maiores conteúdos de água limitantes ao preparo ocorreram na linha de plantio e os menores na zona de tráfego. O carbono orgânico do solo e densidade influenciaram a faixa de conteúdos de água para o preparo do solo. A variação temporal da umidade do solo influenciou a produção de cachos frescos e menores valores de RP. Nos trimestres mais chuvosos, os solos estiveram com PA abaixo do limite crítico (10%). Houve imobilização de nitrogênio nativo do solo, e maior mineralização de potássio dos resíduos. Após a incubação com os resíduos houve aumento de carbono orgânico do solo nas frações físicas da matéria orgânica do solo. A aplicação de 40 Mg ha⁻¹ de EFB permitiu o aumento da pressão de

pré-consolidação no solo arenoso e o índice de compressão evidenciou que a baixa densidade inicial aumenta a suscetibilidade a compactação do solo. As avaliações ao longo do tempo permitiram identificar processos de compactação, que podem ser minimizados pelo manejo conservacionista e aplicação de resíduos ao solo, que também aumentam os teores de nutrientes disponíveis para as plantas.

Palavra-chaves: Faixa de conteúdos de água para o preparo do solo; Compressão do solo; Matéria orgânica; Pressão de pré-consolidação; Umidade do solo.

DIAGNOSIS, MONITORING AND MITIGATION OF COMPACTION IN SOILS CULTIVATED WITH OIL PALM IN THE EASTERN AMAZON

ABSTRACT

Oil palm produces one of the most demanded oils in the world, and its management requires mechanized operations, from soil preparation to periodic fruit harvesting, which can lead to soil compaction. The general objective of this research was to analyze soil physical properties for diagnosis and monitoring, and to propose measures to mitigate the compression of soils cultivated with oil palm in the state of Pará, Eastern Amazonia. The study was conducted in three replantations with oil palm (1999, 2013, 2017), where soil samples were collected in three management zones (crowning, planting line and traffic line) next to twelve plants in each site. During June/2021 to July/2022, soil moisture, root penetration resistance (PR) and aeration porosity (AP) were collected monthly in all sites and management zones. In addition to monitoring the production of fresh fruit bunches. The water contents for the tillage limits were estimated using van Genuchten parameters, and the PR was adjusted to equations that had soil moisture and bulk density as predictor variables. A factorial incubation experiment with residues from the oil palm production chain was conducted under controlled conditions ((4 residues (petiole, leaf, Empty fruit bunches – EFB, MIX) x 6 times – (0, 0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.22 and 0.30 year)) + 1, distributed in four blocks. Where the C-CO₂ emission flux was monitored, in addition to the remaining dry mass of the residue (*msR*), nutrient and the half-life of the residues were calculated. Another experiment was conducted using EFB for uniaxial factorial tests (2 initial bulk densities - BDi x 5 amounts of EFB on the surface - 0, 20, 40, 60, 80 Mg ha⁻¹), with 4 replications. In this test, the compression curve was adjusted, and the pre-consolidation pressure and compression index were taken from it. The results indicated that, in general, the highest water contents limiting tillage occurred in the planting line and the lowest in the traffic zone. Soil organic carbon and bulk density influenced the range of water contents for tillage. The temporal variation in soil moisture influenced the production of fresh bunches and lower PR values. In the wetter trimesters, the soils had AP below the critical limit (10%). There was immobilization of native nitrogen in the soil and greater mineralization of potassium from the residues. After incubation with the residues, there was an increase in soil organic carbon in the physical fractions of soil organic matter. The application of 40 Mg ha⁻¹ of EFB increased the pre-consolidation pressure in the sandy soil and the compression index showed that the low initial density increases the soil's susceptibility to compression. Evaluations over

time have made it possible to identify compression processes, which can be minimized by conservation management and the application of residues to the soil, which also increase the nutrient levels available to plants.

Keywords: Organic matter; Precompression stress; Range of water contents for tillage; Soil compression; Soil moisture.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

| | |
|---|----|
| Figura – 1 Precipitação anual e mensal durante janeiro de 2010 e dezembro 2022 dos plantios com palma de óleo no município de Santa Barbara, Pará, Amazônia Oriental..... | 31 |
| Figura 2 – Umidade do solo monitorada ao longo de treze meses em zonas de manejo relacionadas às faixas de conteúdos de água para preparo do solo ($\Delta\theta_{\text{Ranger}}$) e umidade crítica para a compactação (θ_c) em diferentes profundidades do solo, para as três áreas com híbridos de palma de óleo. Onde, Fig. 2. a, b, c = área 1 nas profundidades 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m; Fig. 2. d, e, f = área 2 nas profundidades 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m; Fig. 2. g, h, i = área 3 nas profundidades 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, respectivamente..... | 42 |
| Figura 3 – Peso médio do cacho de frutas frescas (FFB) em relação à umidade do solo nas zonas de manejo até 0,6 m de profundidade durante o período de avaliação, julho de 2021 a julho de 2022. Fig. 3. a, b e c correspondem as áreas 1, 2 e 3..... | 44 |
| Figura 4 – Dimensões multivariadas das variáveis de crescimento no pico de produção (novembro, dezembro e janeiro) e umidade do solo nas áreas com palma de óleo em Santa Bárbara do Pará, Amazônia Oriental. Biplot mostrando as variáveis de crescimento nas áreas de idades diferentes: círculo vermelho (área P1, ano 1999), círculo verde (área P2, ano 2013) e círculo azul (área P3, ano 2017). Onde, NFFB é o número de cachos de frutos frescos por planta; L é o comprimento dos cachos de frutos frescos; FFB, cachos de frutos frescos; Uv_20, Uv_40 e Uv_60 são as umidades volumétricas nas profundidades 0-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente..... | 45 |

CAPÍTULO 2

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Mapa de localização de plantios de palma de óleo em Santa Bárbara do Pará, Amazônia Oriental..... | 66 |
| Figura 2 – Precipitação e temperatura mensal durante julho de 2021 e junho de 2022 em plantios de palma de óleo no município de Santa Bárbara do Pará, Amazônia Oriental..... | 67 |
| Figura 3 – Médias mensais da resistência a penetração de raízes (RP) nas zonas de manejo coroamento (P) e linha de tráfego de máquinas (LL) em diferentes profundidades de solos cultivados com palma de óleo em Santa Bárbara, Amazônia Oriental..... | 75 |

| | |
|---|----|
| Figura 4 – Distribuição temporal da porosidade de aeração, comparada a porosidade total (PT) do solo nas zonas de manejo, linha de tráfego (LL) e coroamento (P) de plantios com palma de óleo em Santa Bárbara, Pará, Amazônia Oriental..... | 77 |
| Figura 5 – Massa seca de raiz dos plantios de 1999 (P1), 2013 (P2) e 2017 (P3) em três profundidades de solos com palma de óleo em Santa Bárbara do Pará, Amazônia Oriental..... | 80 |
| Figura 6 – Dimensões multivariadas da massa seca de raiz (Raiz) e propriedades físicas de solos com palma de óleo em Santa Bárbara do Pará, Amazônia Oriental. Gráficos biplots mostrando a Área 1 (A), Área 2 (B) e Área 3 (C), que correspondem aos replantios de 1999, 2013 e 2017, respectivamente. O círculo e pontos vermelhos, verdes e azuis estão relacionados a interação na profundidade 0-0,20 m (1), 0,20-0,40 m (2) e 0,40-0,60 m (3), respectivamente..... | 83 |

CAPÍTULO 3

| | |
|--|-----|
| Figura 1 – Frascos de vidro respirométricos com solo e resíduos de palma de óleo durante o experimento de encubação..... | 102 |
| Figura 2 – Unidades experimentais de encubação de solo e resíduos de palma de óleo distribuídas dentro da B.O.D..... | 103 |
| Figura 3 – Emissão de C-CO ₂ durante o período de incubação de um Latossolo Amarelo com adição de resíduos de palma de óleo, pecíolo (PT), folíolo (FT), engaço (EFB), MIX – pecíolo + folíolo + engaço (MIX) e solo sem resíduo (Solo)..... | 107 |
| Figura 4 – Emissão de C-CO ₂ acumulada após 0,30 ano de incubação de um Latossolo Amarelo com resíduos de palma de óleo, pecíolo (PT), folíolo (FT), engaço (EFB), MIX – pecíolo + folíolo + engaço (MIX) e solo sem resíduo (Solo)..... | 108 |
| Figura 5 – Massa seca remanescente dos resíduos (<i>msR</i>) de palma de óleo, pecíolo (PT), folíolo (FT), engaço (EFB) e MIX em função dos tempos de incubação..... | 108 |
| Figura 6 – Teor de C na fração de MOP (A) e na fração MOAM (B); teor de N na fração MOP (C) e na fração MOAM (D) do solo após 0,30 ano de incubação com resíduos de palma de óleo, pecíolo (PT), folíolo (FT), engaço (EFB), MIX (PT+FT+EFB) e solo sem resíduo..... | 111 |
| Figura 7 – Teores finais de macronutrientes, Fósforo (A), Potássio (B), Cálcio (C) e Magnésio (D) no Latossolo Amarelo após 0,30 anos de incubação com resíduos de palma de óleo..... | 113 |

| | |
|---|-----|
| Apêndice B – Decomposição de resíduos de palma de óleo e presença de microrganismos nos diferentes tempos de incubação..... | 127 |
|---|-----|

CAPÍTULO 4

| | |
|---|-----|
| Figura 1 – Sacos flexíveis com EFB, na superfície dos anéis, e durante o ensaio de compressão uniaxial..... | 133 |
| Figura 2 – Taxa de variação da densidade do solo (crBD) em resposta a aplicação de pressões verticais em solos arenosos e argilosos com diferentes quantidades de engajo (EFB) na superfície..... | 136 |
| Figura 3 – Influência da engajos de palma de óleo (EFB) na pressão de pré-consolidação (σ_p) de solos arenosos e argilosos em diferentes densidades do solo inicial (BD)..... | 137 |

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

| | |
|--|----|
| Tabela 1 Classe textural e distribuição granulométrica de solos cultivados com híbridos de palma de óleo em Santa Bárbara, Estado do Pará, Brasil. (Média \pm Desvio padrão)..... | 32 |
| Tabela 2 – Variação das propriedades físicas do solo, carbono orgânico (SOC), densidade do solo (ρ_b), porosidade total (TP), microporosidade (MiC) e macroporosidade (MaC) em zonas de manejo e profundidades de solos com híbridos de palma de óleo..... | 37 |
| Tabela 3 Parâmetros ajustados à equação de van Genuchten de retenção de água no solo, para as zonas de manejo e profundidades do solo com híbridos de palma de óleo em Santa Bárbara do Pará, Amazônia Oriental..... | 39 |
| Tabela 4 Conteúdos de água nos limites de preparo do solo ótimo (θ_{OPT}), úmido (θ_{WTL}), seco (θ_{DTL}), capacidade de campo (θ_{FC}), ponto de murcha permanente (θ_{WP}), água disponível (θ_{AW}) em zonas de manejo e profundidades de solos com híbridos de palma de óleo em Santa Bárbara do Pará, Amazônia Oriental..... | 40 |
| Tabela 5 Regressão múltipla e coeficientes de análise para a relação entre a faixa de conteúdo de água adequada ao preparo e o carbono orgânico e densidade do solo com híbrido de palma de óleo: $\Delta\theta_{Ranger} = b_0 + b_1SOC + b_2\rho_b$ | 43 |
| Tabela 6 Resumo da análise multivariada de características produtivas de híbridos de palma de óleo e umidade do solo até 0,60 m..... | 45 |

CAPÍTULO 2

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Médias do carbono orgânico do solo (SOC), distribuição granulométrica e densidade (ρ_b) do Latossolo Amarelo cultivados com híbridos de palma de óleo em Santa Bárbara, Estado do Pará, Brasil. Média \pm Desvio padrão..... | 67 |
| Tabela 2 – Médias da resistência a penetração de raiz e porosidade de aeração em função do tempo de replantio e zonas de manejo em solo cultivado com palma de óleo em Santa Bárbara, Amazônia Oriental..... | 73 |
| Tabela 3 – Regressão polinomial e coeficientes de regressão para a relação entre a resistência a penetração e a profundidade do solo com híbrido de palma de óleo: $PR = -b_2Prof^2 + b_1Prof - b_0$ | 76 |
| Tabela 4 – Resistência a penetração de raiz ajustada a equação 4, critério de Akaike (AIC) e indicadores estatístico aplicados em áreas, zonas e profundidades do Latossolo Amarelo com palma de óleo em Santa Bárbara, Amazônia Oriental..... | 79 |

| | |
|---|----|
| Tabela 4 – Resumo da análise multivariada das propriedades físicas do solo e massa seca radicular de híbridos de palma de óleo..... | 81 |
| Tabela S1 – Critério de Akaike e indicadores estatístico das curvas de resistência a penetração em função da umidade e densidade do solo do subconjunto de dados..... | 96 |

CAPÍTULO 3

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Caracterização das propriedades físicas e químicas iniciais do Latossolo Amarelo utilizado no experimento de incubação com resíduos de palma de óleo..... | 101 |
| Tabela 2 – Caracterização inicial química e bioquímica dos resíduos de palma de óleo utilizados no experimento de incubação..... | 105 |
| Tabela 3 – Equações ajustadas para a decomposição e tempos de meia-vida ($t_{0,5}$) dos resíduos de palma de óleo..... | 109 |
| Tabela 4 – Conteúdo de nutrientes remanescente (CNR), média inicial (C_i), final (C_f), quantidade de nutriente mineralizada (QM) até 0,30 anos e porcentagem mineralizada (PM) de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio dos resíduos de palma de óleo..... | 110 |
| Apêndice A – Modelos de decaimento exponencial testados para ajustar a decomposição dos resíduos de palma de óleo..... | 126 |

CAPÍTULO 4

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Caracterização física dos solos, arenoso e argiloso, utilizados no ensaio uniaxial..... | 132 |
| Tabela 2 – Pressão de pré-consolidação (σ_p) e índice de compressão (IC) em função da aplicação de engajo (EFB) na superfície de solo arenoso e argiloso em diferentes densidades do solo iniciais..... | 135 |
| Apêndice A – Atividades de manejo e conjunto de máquinas e implementos que trafegam nas áreas com palma de óleo em Santa Bárbara, Amazônia Oriental..... | 145 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| | |
|---|--|
| WRC – Curva de retenção de água no solo | FFB – Cachos de frutos frescos |
| θ_s – Conteúdo de água na saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); | EFB – cachos de frutos vazios (<i>Empty fruit bunches</i>) |
| θ_r – Conteúdo de água residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); | RP – Resistência de penetração a raízes (MPa); |
| α, n – Parâmetros da equação de van Genuchten | PA – Porosidade de aeração ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) |
| θ_{WTL} – Conteúdo de água no limite de preparo úmido ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); | σ_p - Pressão de pré-consolidação; |
| θ_{DTL} - Conteúdo de água no limite de preparo seco ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); | P – Zona de coroamento |
| θ_{OTP} – Conteúdo de água ótimo para operações mecanizadas ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); | LL – Zona de tráfego agrícola |
| θ_{INFL} – Conteúdo de água no ponto de inflexão ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); | EL – Linha de plantio |
| h_{DTL} – Potencial matricial no limite de preparo seco (hPa); | PT – Pecíolo FT – Folíolo |
| $\theta_{\Delta\text{Ranger}}$ – Faixa de água adequada para operações mecanizadas ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); | IC – Índice de compressão |
| θ_{FC} – Capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); | crBD – Taxa de variação da densidade do solo |
| θ_{WP} – Ponto de murcha permanente ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); | BDi – Densidade do solo inicial |
| θ_g – Umidade gravimétrica (kg kg^{-1}); | Ci – Concentração inicial de nutriente |
| θ – Umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); | Cf – Concentração final de nutriente |
| Msu – Massa de solo úmido (g); | |
| Mss – Massa de solo seco (g); | |
| NPK -Nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente | |
| SOC – Carbono orgânico do solo (g kg^{-1}); | |
| ρ_b - densidade do solo (g cm^{-3}) | |
| ρ_s – densidade de partícula (g cm^{-3}) | |
| Mic – Microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); | |
| Mac – Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); | |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| CONTEXTUALIZAÇÃO..... | 18 |
| Objetivo geral..... | 21 |
| Objetivos específicos..... | 21 |
| REFERÊNCIAS..... | 23 |
| CAPÍTULO 1 - CONTEÚDOS DE ÁGUA LIMITANTES PARA COMPACTAÇÃO INDUZIDA POR OPERAÇÕES MECANIZADAS EM SOLO COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL..... | 27 |
| 1 Introdução..... | 28 |
| 2 Material e métodos..... | 30 |
| 2.1 Localização e caracterização da área..... | 30 |
| 2.2. Amostragem do solo..... | 32 |
| 2.3. Determinação das propriedades físicas do solo..... | 33 |
| 2.4. Estimativa do conteúdo de água limitantes para operações mecanizadas por meio da Curva de Retenção de Água (WRC)..... | 34 |
| 2.5 Determinação do conteúdo de água do solo crítico para compactação do solo..... | 35 |
| 2.6 Análise de crescimento da planta..... | 36 |
| 2.7 Análises estatística..... | 36 |
| 3 Resultados..... | 36 |
| 3.1. Propriedades físicas do solo nas zonas de manejo..... | 36 |
| 3.2. Conteúdos de água limitantes para operações mecanizadas..... | 38 |
| 3.3. Relação entre o $\Delta\theta_{Range}$, p_b e SOC..... | 43 |
| 3.4. Relação entre a umidade do solo e a produção de cachos de frutos frescos..... | 43 |
| 4 Discussão..... | 46 |
| 5 Conclusão..... | 52 |
| Referências..... | 53 |
| CAPÍTULO 2 - VARIAÇÃO TEMPORAL DE PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO LIMITANTES AO CRESCIMENTO RADICULAR EM PLANTIOS DE PALMA DE ÓLEO NA AMAZONIA ORIENTAL..... | 62 |
| 1 Introdução..... | 63 |
| 2 Material e métodos..... | 66 |
| 2.1 Área de estudo..... | 66 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2 Amostragem..... | 68 |
| 2.3 Análises de solo..... | 69 |
| 2.4 Seleção da equação de ajuste da resistência a penetração..... | 70 |
| 2.5 Variável biológica..... | 71 |
| 2.6 Análise estatística..... | 72 |
| 3 Resultados..... | 72 |
| 3.1 Efeito dos replantios e zonas de manejo resistência a penetração e porosidade de aeração..... | 72 |
| 3.2 Estimativa da resistência a penetração de raiz..... | 78 |
| 3.3 Propriedades do solo relacionadas massa seca de raiz..... | 79 |
| 4 Discussão..... | 84 |
| 5 Conclusão..... | 88 |
| Referências..... | 89 |
| SUPLEMENTAR..... | 96 |
| CAPÍTULO 3 - DECOMPOSIÇÃO E LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES DE RESÍDUOS DE PALMA DE ÓLEO EM SOLO DE TEXTURA ARENOSA..... | 98 |
| 1 Introdução..... | 99 |
| 2 Material e métodos..... | 101 |
| 2.1 Experimento de incubação..... | 101 |
| 2.2 Coleta e determinação do fluxo de C-CO ₂ | 102 |
| 2.3 Massa seca remanescente e conteúdo dos nutrientes remanescentes..... | 103 |
| 2.4 Caracterização química e bioquímica inicial dos resíduos..... | 105 |
| 2.5 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS) e quantificação dos nutrientes no solo antes e após 0,30 ano..... | 105 |
| 2.6 Análise estatística..... | 106 |
| 3 Resultados..... | 106 |
| 3.1 Fluxos de C-CO ₂ | 106 |
| 3.2 Decomposição dos resíduos..... | 108 |
| 3.3 Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) e relação C/N nas frações da matéria orgânica do solo..... | 111 |
| 3.4 Teores finais de macronutrientes no solo..... | 112 |
| 4 Discussão..... | 113 |
| 5 Conclusão..... | 120 |
| REFERÊNCIAS..... | 120 |

| | |
|--|------------|
| APÊNDICE..... | 126 |
| CAPÍTULO 4 – ENGAÇO DE PALMA DE ÓLEO COMO MITIGADOR DA COMPACTAÇÃO DO SOLO..... | 129 |
| 1 Introdução..... | 130 |
| 2 Material e métodos..... | 132 |
| 2.1 Solo e tratamentos experimentais..... | 132 |
| 2.2 Ensaio de compressão uniaxial..... | 133 |
| 2.3 Análise estatística..... | 134 |
| 3 Resultados..... | 134 |
| 4 Discussão..... | 137 |
| 5 Conclusão..... | 140 |
| REFERÊNCIAS..... | 140 |
| APÊNDICE..... | 145 |

CONTEXTUALIZAÇÃO

A fronteira agrícola da dendeicultura na Amazônia teve início na década de 1960, visando o desenvolvimento econômico e social da região. Extensos plantios foram estabelecidos principalmente no Estado do Pará, maior produtor atual de óleo de palma do Brasil (98,56%), cerca de 2.846.023 toneladas em 2021 (SEDAP, 2022). No início, monocultivos foram estabelecidos com a palma africana (*Elaeis guineenses* Jacq), susceptível ao amarelecimento fatal (AF), principal anomalia que acomete os plantios. O AF acometeu cerca de 7.000 ha no Brasil, causando grandes prejuízos econômicos, o que motivou pesquisas aplicadas para o desenvolvimento do híbrido interespecífico (*Elaeis guineenses* Jacq. x *Elaeis Oleifera* (H.B.K.) Cortés), resistente ao AF, e oriundo do cruzamento da palma africana (Dendê) com a palma americana (Caiaué) (CORLEY e TINKER, 2015).

O óleo de palma é uma *commodity* destinada principalmente para indústria alimentícia e biodiesel, por isso, a expansão dos plantios foram incentivados a partir de políticas públicas, como o Decreto-Lei 7.172 (BRASIL, 2010), que aprovou o Zoneamento Agroecológico da Palma de Óleo na Amazônia e a criação da Câmara Setorial da Palma de Óleo instituída pelo Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), em parceria com o setor privado (RAMALHO FILHO et al., 2010; VEIGA e RODRIGUES, 2016). O setor produtivo da palma de óleo no Pará emprega cerca de 20 mil pessoas, principalmente no polo que compreende os municípios de Acará, Moju, Tailândia e Tomé-Açu (SEDAP, 2022). O polo da região metropolitana de Belém, onde esta pesquisa foi desenvolvida, comporta os municípios de Santa Barbara, Benevides, Santa Izabel e Santo Antônio do Tauá. Este último foi o município pioneiro no plantio de híbrido interespecífico.

O zoneamento agroecológico orientou a expansão dos plantios em áreas já desmatadas e antigas pastagens, em solos principalmente da classe dos Latossolos e Argissolos com texturas diversas (RAMALHO FILHO et al., 2010). Áreas cultivadas com óleo de palma são vulneráveis a compactação, devido à realização de diversas operações mecanizadas ao longo do ciclo da cultura, cerca de 25 anos (ZURAIDAH et al., 2012; ZURAIDAH et al., 2010; SATO et al., 2017). Na implantação da cultura é feito o preparo do solo, com aração e gradagem, e no decorrer da produção o tráfego agrícola ocorre de forma intensiva, para atividades como adubação, roçagem e cambitagem (retirada mecanizada dos cachos colhidos). O manejo da palma forma zonas com heterogeneidade das propriedades do solo, que são influenciadas pela deposição de material orgânico e tráfego agrícola (de OLIVEIRA et al., 2022).

A quantidade de água presente no solo no momento do preparo ou no tráfego influencia a compactação do solo (LIU et al., 2022). Assim grande atenção deve ser dada aos riscos de compactação com o manejo de palma de óleo, pois, na região Amazônica, a precipitação média anual é superior a 2.000 mm, distribuídos ao longo de duas estações, uma mais chuvosa (dezembro a maio) e outra mais seca (junho a novembro). Isto sugere que operações mecanizadas possivelmente estão sendo realizadas em condições de umidade do solo inadequadas ao manejo com máquinas.

A compactação do solo é uma das formas de degradação responsável por perdas estimadas em 68 milhões de hectares de solo, ocasionada principalmente pelo pisoteio do rebanho e tráfego de máquinas agrícolas em condições inadequadas de umidade (FAO e ITPS, 2015). Esta é a principal forma de degradação, que compromete a qualidade do solo ao redor do mundo (BATEY, 2009; HAMZA e ANDERSON, 2005). Estima-se que até 2050 cerca de 680.000 km², ou 4% da área total da terra serão degradados devido a compactação do solo (FAO, 2015). A compactação resulta na redução do espaço poroso, onde o volume total de poros é reduzido e a densidade do solo aumenta, devido ao menor quantitativo de macroporos. Nestas condições, as funções do solo associadas ao movimento de água, infiltração e drenagem ficam comprometidas, bem como, ocorre a diminuição das trocas gasosas e o aumento da resistência a penetração de raízes (REISER et al., 2020; LONGEPIERRI et al., 2021; CASTIONI et al., 2021).

A resistência do solo diminui o crescimento radicular vertical e aumenta o engrossamento das raízes, o que limita a absorção de nutrientes principalmente em caso de déficit hídrico (CARR, 2011), quando é necessário um sistema radicular mais profundo para a captação de água e nutrientes (ZURAIDAH et al., 2010). A variação temporal da umidade do solo influencia a resistência a penetração e compromete o crescimento de raízes no período seco (SATO et al., 2017), porque com baixa umidade o efeito lubrificante da água é reduzido promovendo maior atrito entre as partículas do solo, aumentando a resistência do solo a penetração de raízes (SHAH et al., 2017).

Na Amazônia as mudanças climáticas são intensificadas pelo fenômeno El Niño, que impactam a produção das culturas (IPAM, 2023), incluindo a palma de óleo, devido prolongados períodos de estiagem, provocando baixa emissão de inflorescência feminina e pouca produção de cachos frescos (ABRAPALMA, 2016). Estima-se que cada 100 mm de déficit hídrico corresponda entre 10 e 20% de redução em produtividade da palma (CARR,

2011). O déficit hídrico agrava os efeitos da compactação do solo, causando maiores impedimentos ao desenvolvimento radicular (SHAH et al., 2017).

Os efeitos do déficit hídrico são observados na produção de 21 a 26 meses após o ocorrido (CULMAN et al., 2019). Em 2015 na Agropalma a produção de cachos de frutos frescos teve queda de 9,90% provocada pelo déficit hídrico do ano anterior de 355,4 mm. Plantios de palma em Santa Bárbara e Santo Antônio do Tauá apresentaram queda de produção 20 e 35%, respectivamente. A Denpasa relatou perda de 40% e a Belém Bioenergia estimou perda de 35% em 2016 (ABRAPALMA, 2016).

Outro cenário climático tem ocorrido nesta região, caracterizado por alta precipitação em períodos que naturalmente são mais secos, influenciadas pelos eventos da La Niña, que impacta o Brasil aumentando a precipitação nas regiões Norte e Nordeste (NOAA, 2023). O relatório do IPCC aponta que as mudanças climáticas ocasionarão cada vez mais mudanças severas, e extremos de seca e alagamentos na Amazônia (IPCC, 2023; NOAA, 2023). Essas mudanças podem agravar os efeitos negativos da compactação do solo em cultivos na região, pois a seca em combinação com compactação promove o aumento de resistência mecânica do solo, e consequente redução do crescimento de plantas (SHAH et al., 2017). Por outro lado, o aumento de precipitação pode ocasionar excesso de escoamento superficial e alagamentos em solos compactados e “pobres” em propriedades hidráulicas. Além disso, solo mais úmido se torna ainda mais propenso à compactação (OBOUR et al., 2019a).

Uma alternativa para atenuar os efeitos da compactação nos solos com palma de óleo e fornecer nutrientes as plantas é o retorno de resíduos produzidos ao longo da cadeia produtiva da cultura (ANYAOHA et al., 2018). No estado do Pará em 2017 foram produzidas 480 mil toneladas de óleo de palma, gerando aproximadamente 1,4 milhões de toneladas de resíduos sólidos e líquidos. Além disso, em números uma tonelada de cacho de fruta fresca que chega na indústria produz em média 220 kg de cacho vazio, 120 kg de fibra prensada, 50 kg de casca, 20 kg de palmiste, 60 kg de sedimento lamacento e entre 650 kg e 1.000 kg de efluente (EMBRAPA, 2018). O cacho vazio ou engaço (*Empty fruit bunch* – EFB) é o resíduo de maior volume, sendo muitas vezes descartados e submetidos a decomposição natural em pátios próximos as indústrias ao redor do mundo (ADU et al., 2022). Aproximadamente quatro toneladas de EFB são geradas em um hectare por ano (TAPIA et al., 2021; OBADA et al., 2023).

O EFB é um material de baixa densidade e rico em holocelulose e lignina (ANYAOHA et al., 2018), que apresenta relação C/N abaixo de 1/18 e pH > 6,0, e pode ser utilizado como

condicionante do solo melhorando a qualidade física (FURLAN et al., 2003; TARIGAN et al., 2019). Outros resíduos de palma de óleo foram avaliados após decomposição durante oito meses em campo, e liberaram quantidades expressivas de nutrientes dos folíolos, pecíolos e EFB, onde o conteúdo de nitrogênio foi 90, 25 e 49% oriundo da concentração inicial, destes resíduos, respectivamente (MORADI et al., 2014). A aplicação de EFB influenciou positivamente no aumento do teor de fósforo, saturação por bases, e estabilidade de agregados do solo, bem como diminuiu a densidade do solo (TAO et al., 2017; TAO et al., 2018).

A aplicação de EFB ao solo serviu como barreira de vapor para perdas de umidade do solo e melhorou a agregação, influenciada pelo aumento do carbono orgânico no solo (WRIGHT e HONS, 2005). Pesquisas anteriores atestaram a contribuição positiva da adição de EFB ao solo na melhoria das propriedades físicas, através do aumento de água disponível, porosidade total, estabilidade de agregados, proteção do solo contra erosão e aumento da fertilidade (MULUMBA e LAL, 2008; CARRON et al., 2015; MORADI et al., 2014; ANYAOBA et al., 2018).

Nesse sentido, o estabelecimento de conteúdos de água limitantes ao preparo e o monitoramento de propriedades físicas do solo são importantes para o diagnóstico de risco da compactação do solo, e definição de ações de manejo mais sustentáveis. O uso de resíduos orgânicos, além de diminuir os gastos com fertilizante mineral podem atenuar os efeitos da compactação no solo relacionados ao estresse provocado por máquinas agrícolas. O manejo sustentável de solos com palma de óleo pode aumentar as janelas de oportunidade ao tráfego agrícola priorizado a qualidade do solo, e atendendo aos objetivos de desenvolvimento sustentável, relacionados à fome zero, agricultura sustentável e ação contra mudanças climáticas.

Objetivo geral

Analisar propriedades físicas do solo para o diagnóstico e monitoramento, e propor medidas de mitigação da compactação de solos cultivados com palma de óleo no estado do Pará, Amazônia Oriental.

Objetivos específicos

1. Estimar a faixa de conteúdo de água limitante ao processo de compactação induzido por operações mecanizadas.

2. Avaliar o efeito dos replantios, zonas de manejo e variação temporal na resistência a penetração e porosidade de aeração;
3. Identificar quais propriedades do solo influenciam na massa seca de raízes de palma de óleo;
4. Selecionar uma equação representativa para o diagnóstico e monitoramento da compactação em solo com palma de óleo;
5. Avaliar a decomposição e a mineralização de resíduos de palma de óleo em solo de textura arenosa ao longo de 0,30 ano de incubação;
6. Analisar a contribuição de resíduos de palma de óleo nas frações físicas da matéria orgânica e disponibilidade de macronutrientes no solo de textura arenosa.
7. Estabelecer a pressão de pré-consolidação e índice de compressão de solos de textura Areia franca e Muito argiloso após a adição de engaço (EFB) de palma de óleo em superfície.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE ÓLEO DE PALMA. Déficit hídrico e impacto na produção de óleo de palma. **Nota técnica**, n 01, 2016.
- ADU, M. O.; ATIA, K.; ARTHUR, E.; ASARE, P. A.; OBOUR, P. B.; DANSO, E. O.; FRIMPONG, K. A.; SANLERI, K. A.; ASARE-LARBI, S.; ADJEI, R.; MENSAH, G.; ANDERSEN, M. N. The use of oil palm empty fruit bunches as a soil amendment to improve growth and yield of crops. A meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, p. 13, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00753-z>
- ANYAOHAA, K. E.; SAKRABANIA, R.; PATCHIGOLLAB, K.; MOUAZEN, A. M. Critical evaluation of oil palm fresh fruit bunch solid wastes as soil amendments: Prospects and challenges. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 136, p. 399–409, 2018.
- BATEY T. Soil compaction and soil management—a review. **Soil Use Manag**, 25: 335–345, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x>
- BRASIL. Decreto Nº 7.172, 7 Maio 2010. **Zoneamento agroecológico da cultura da palma de óleo**. Disponível em: https://www.springer.com/journal/42729/submission-guidelines#Instructions%20for%20Authors_References Acesso em: 27 jan 2023.
- CARR M. K. V. The water relations and irrigation requirements of oil palm (*Elaeis guineensis*): A review. **Expl Agric** 47(4): 629–652, 2011. <https://doi.org/10.1017/S0014479711000494>
- CARRON, M. P.; PIERRAT, M.; SNOECK, D.; VILLENAVE, C.; RIBEYRE, F.; SUHARDI, MARICHAL, R.; CALIMAN, J. P. Temporal variability in soil quality after organic residue application in mature oil palm plantations. **Soil Research**, v. 53, p. 205–215, 2015. <https://doi.org/10.1071/SR14249>.
- CASTIONI, G. A. F.; DE LIMA, R. P.; CHERUBIN, M. R.; BORDONAL, R.O.; ROLIM, M. M.; CARVALHO, J. L. N. Machinery traffic in sugarcane straw removal operation: stress transmitted and soil compaction. **Soil Tillage Res**, 213:105122, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105122>
- CORLEY, R. H. V and TINKER, P. B. H. **Diseases of the oil palm: The Oil Palm**. 5th. ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2015.
- CULMAN, M.; FARIAS, C. M. DE.; BAYONA, C.; CRUZ, J. D. C. Using agrometeorological data to assist irrigation management in oil palm crops: A decision support method and results from crop model simulation. **Agric. Water Manag.**, v. 213, p. 1047–1062, 2019.
- de OLIVEIRA, R. L. L.; VASCONCELOS, S. S.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA-JUNIOR, A. B.; CASTELLANI, D. C.; KATO, O. R. Management Practices Affect Soil Carbon and Physical Quality in Oil Palm Agroforestry Systems in the Amazon. **J Soil Sci Plant Nutr**, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00947-0>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Cientistas usam resíduos de dendê para cultivar cogumelos comestíveis. Embrapa Amazônia Oriental e Agroenergia, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/32958747/cientistas-usam-residuos-do-dende-para-cultivar-cogumelos-comestiveis>. Acesso em: 08 de maio de 2024.

FOOD OF AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy, 2015. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/items/f16010ce-1874-4108-bd03-a6a592e2e53a> Acesso em: 08 de maio de 2024.

FURLAN JUNIOR, J. **Dendê: manejo e uso de subprodutos e dos resíduos**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2006. 40 p.

HAMZA MA e ANDERSON WK. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil Tillage Res** 82:121–45, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>

INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA. Tudo o que você queria saber sobre fogo na Amazônia, mas não sabia para quem perguntar. 2023 (Português) Available via DIALOG <https://ipam.org.br/cartilhas-ipam> Accessed 21 nov 2023.

INTERGOVERNMENTAL PAINEL ON CLIMATE CHANGE, 2023: **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

LIU, H.; COLOMBI, T.; JÄCK, O.; KELLER, T.; WEIH, M. Effects of soil compaction on grain yield of wheat depend on weather conditions. **Sci. Total Environ.**, v. 807, 2022.

LONGEPIERRE, M.; WIDMER, F.; KELLER, T.; WEISSKOPF, P.; COLOMBI, T.; SIX, J.; HARTMANN, M. Limited resilience of the soil microbiome to mechanical compaction within four growing seasons of agricultural management. **ISME Communications** 1:44, 2021 <https://doi.org/10.1038/s43705-021-00046-8>

MORADI, A.; SUNG, C.T.B.; GOH, K.J.; HANIF, A.H.M.; ISHAK, C.F. Effect of four soil and water conservation practices on soil physical processes in a non-terraced oil palm plantation. **Soil & Tillage Research**, v. 145, p. e62–e71, 2014.

MULUMBA, L. N.; LAL, R. Mulching effects on selected soil physical Properties. **Soil & Tillage Research**, v. 98, p. 106–111, 2008.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **What to watch for: El Niño likely to develop this summer**. 2023 Available via DIALOG. <https://www.noaa.gov/news/what-to-watch-for-el-nino-likely-to-develop-summer> Accessed 24 Apr. 2023.

OBADA, D. O.; KEKUNG, M. O.; LEVONYAN, T.; NORVAL, G. W. Palm oil mill derived empty palm fruit bunches as a feed stock for renewable energy applications in Nigeria: A review. *Bioresource Technology Reports*, v. 24, p. 101666, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101666>

OBOUR, P. B.; KELLER, T.; JENSEN, J.L.; EDWARDS, G.; LAMANDÉ, M.; WATTS, C. W.; SØRENSEN, C. G.; MUNKHOLM, L. J. Soil water contents for tillage: A comparison of approaches and consequences for the number of workable days. *Soil Tillage Res* 195, 2019a. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104384>

RAMALHO FILHO.; A, MOTTA, P.E.F. DA.; FREITAS, P.L. DE.; TEIXEIRA, W.G. **Agroecological zoning, production and management of oil palm culture in the Amazon**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2010. 216 p. ISBN 978-85-85864-34-7

REISER, R.; STADELMANN, V.; WEISSKOPF, P.; GRAHM, L.; KELLER, T. System for quasicontinuous simultaneous measurement of oxygen diffusion rate and redox potential in soil. *J Plant Nutr Soil Sci*, 183:316–26, 2020. <https://doi.org/10.1002/jpln.201900518>

SATO, M. K.; DE LIMA, H. V.; FERREIRA, R. L. DA C.; RODRIGUES, S.; DA SILVA, A. P. Least limiting water range for oil palm production in Amazon region, Brazil. *Sci Agric*, v. 74, p.148–156, 2017. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2015-0408>

SECRETARIAT FOR AGRICULTURAL DEVELOPMENT AND FISHERIES. Municipal Agricultural Production – 2021: Panel - Federal Units of Brazil. Available via DIALOG. 2022 https://lookerstudio.google.com/u/0/reporting/2315899e-632b-4396-b631-8314f6b21830/page/p_6diq4m2a0c?s=nOGgfbuYGqo Accessed 27 jan 2023

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 cropproductivity: an overview. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, v. 24, n. 11, p. 10056–10067, 2017.

TAO, H. H.; SNADDON, J. L.; SLADE, E. M.; CALIMAN, J. P.; WIDODO, R. H.; SUHARDI, WILLIS, K. J. Long-term crop residue application maintains oil palm yield and temporal stability of production. *Agron. Sustain.* v. 37, p. 33, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0439-5>.

TAO, H. H.; SNADDON, J. L.; SLADE, E. M.; HENNERON, L.; CALIMAN, J. P.; WILLIS, K. J. Application of oil palm empty fruit bunch effects on soil biota and functions: A case study in Sumatra, Indonesia. *Agric Ecosyst Environ*, v. 256, p. 105–113, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.012>

TAPIA, J. F. D.; DOLIENTE, S. S.; SAMSATLI, S. How much land is available for sustainable palm oil?. *Land Use Policy*, v. 102, p. 105187, 2021.

TARIGAN, R. S.; SUHARDI.; WAHYUNINGSIH, R.; PUJANTO.; WAHYUNINGSIH, P. A.; MARICHAL, R.; CALIMAN, J. P. The role of oil palm biomass recycling on soil health in oil palm plantations. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, v. 336, 2019. doi:10.1088/1755-1315/336/1/012019

VEIGA, J. P. C.; RODRIGUES, P. C. Transnational arenas, public policies and the environment: the case of palm in the Amazon. **Ambiente & Sociedade**, v. XIX, n. 4 n p. 1-20, 2016.

WRIGHT, A. L., HONS, F. M. Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 69, p. 141–147, 2005.

ZURAI DAH, Y.; AHMAD, T. M.; MOHD, H. H.; ABD, R. S. Oil palm adaptation to compacted alluvial soil (*Typic Endoaquepts*) in Malaysia. **J. Oil Palm Res.**, v. 24, 2012.

ZURAI DAH, Y.; AMINUDDIN, H.; JAMAL, T.; JAMAREI, O.; OSUMANU, H. A.; MOHAMADU, B.J. Oil Palm (*Elaeis guineensis*) Roots Response to Mechanization in Bernam Series Soil. **Am J Appl Sci.**, v. 7, n. 3, p. 343-348, 2010.

CAPÍTULO 1 - CONTEÚDOS DE ÁGUA LIMITANTES PARA COMPACTAÇÃO INDUZIDA POR OPERAÇÕES MECANIZADAS EM SOLO COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Manuscrito publicado na *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*.
<https://doi.org/10.1007/s42729-023-01474-2>

RESUMO

O óleo de palma é uma commodity e o estabelecimento dos plantios e manejo são realizados com operações mecanizadas que induzem zonas de manejo com impactos nas propriedades físicas do solo. O objetivo foi estimar a faixa de conteúdo de água limitante ao processo de compactação induzido por operações mecanizadas. A amostragem considerou as zonas de manejo da palma de óleo: coroamento, linha de tráfego de máquinas e linha de plantio em três cultivos nas profundidades 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Os parâmetros da equação de van Genuchten (θ_s , θ_r , α , n) foram usados para estimar os conteúdos de água no limite úmido, seco e ótimo para o preparo do solo e a faixa de conteúdos de água para o preparo do solo ($\Delta\theta_{\text{Ranger}}$). Determinou-se a umidade crítica para a compactação, porosidade, densidade e carbono orgânico do solo. Houve diferenças entre as zonas de manejo, sobretudo na profundidade superficial e, em geral, os maiores conteúdos de água limitantes ao preparo ocorreram na linha de plantio e os menores na zona de tráfego. Regressões múltiplas mostraram a influência do carbono orgânico e densidade do solo no $\Delta\theta_{\text{Ranger}}$. A variação temporal da umidade do solo influenciou a produção de cachos de frutos frescos, principalmente em plantios mais antigos. Os solos foram trafegados acima do limite úmido de preparo e crítico de compactação nos meses de maior pluviosidade, evidenciando a importância do $\Delta\theta_{\text{Ranger}}$ no planejamento de operações mecanizadas, buscando o manejo mais sustentável da palma de óleo.

Palavras-chave: faixa de conteúdos de água para o preparo do solo, compactação do solo; tráfego de máquinas; umidade do solo.

LIMITING WATER CONTENT FOR COMPACTION INDUCED BY MECHANIZED OPERATIONS IN THE SOIL WITH OIL PALM IN THE EASTERN AMAZON

ABSTRACT

Oil palm is a commodity, and the establishment of plantations and management are carried out using mechanized operations, which induce management zones with impacts on the physical properties of the soil. The objective of this work was to estimate the range of water content limiting the compaction process induced by mechanized operations. Sampling considered the following oil palm management zones: crest, machine traffic line, and planting row in three crops at depths 0–0.20, 0.20–0.40, and 0.40–0.60 m. The parameters of the van Genuchten equation (θ_s , θ_r , α , n) were used to estimate the water contents at the wet, dry, and optimum limit for tillage, and the range of water contents for tillage ($\Delta\theta_{\text{Ranger}}$). We determined the critical moisture for soil compaction, porosity, bulk density, and organic carbon. A difference was found between the management zones, especially in surface depth. In general, the highest water content limiting for tillage occurred in the planting line and the lowest in the traffic zone. Multiple regressions showed the influence of organic carbon and soil density on $\Delta\theta_{\text{Ranger}}$. In Addition, the temporal variation of soil moisture influenced the production of fresh fruit bunches, particularly in older plantations. The soils were trafficked above the wet tillage limit and critical compaction limit in the months of highest rainfall, showing the importance of $\Delta\theta_{\text{Ranger}}$ in the planning of mechanized operations, seeking more sustainable management of oil palm.

Keywords: Range of water contents for tillage, Machine traffic, Soil compression, Soil moisture

1 Introdução

A palma de óleo é uma das oleaginosas mais demandadas no cenário agrícola mundial, pois tem maior rendimento de óleo por hectare, cerca de 37,3%, comparada a soja (Brasil, 2018). As principais espécies produtivas são *Elaeis guineenses* Jacq. e o híbrido interespecífico (*Elaeis guineenses* Jacq. x *Elaeis Oleifera* (H.B.K.) Cortés). O óleo da palma é destinado principalmente para a indústria alimentícia (70%), sendo crescente sua destinação para produção de biodiesel (2,48%), em razão de pressões sobre o preço do petróleo provocadas pela pandemia da Covid-19 e conflitos na Europa (Rahman et al. 2021; Milanez, 2022).

Os maiores produtores mundiais de óleo de palma são Malásia e Indonésia, sendo o Brasil o nono produtor mundial, responsável 2,9 milhões de toneladas de cachos de frutos frescos em 2021. Na Amazônia está o maior produtor, o estado do Pará, responsável por 98,56% da produção nacional (Sedap, 2021). As áreas produtoras no Pará começaram a ser cultivadas na década de 1960 e foram expandidas a partir do Zoneamento Agroecológico da Palma de Óleo, que direcionou o estabelecimento da cultura apenas em áreas já desmatadas, como antigas pastagens (Ramalho Filho et al., 2010; Benami et al., 2018; Almeida et al., 2020). O Brasil importa cerca de 40% do óleo de palma consumido, por isso, existe a expectativa de expansão de plantios principalmente na Amazônia, onde cerca de 30 milhões de hectares foram classificados como preferenciais e regulares para o plantio de palma de óleo (Brasil, 2018; Sedap, 2021).

As grandes plantações estão estabelecidas sobretudo em áreas com Latossolos e Argissolos distróficos com limitações químicas, relacionados a baixa capacidade de troca de cátions (Ramalho Filho et al., 2010; Benami et al., 2018). No campo, os agricultores manejam a cultura buscando corrigir estas limitações por meio de adubações, manejo de plantas de cobertura e roçagens (Viégas et al., 2022; Costa et al., 2023). As atividades para o preparo do solo e manejo da cultura são realizadas por máquinas e implementos pesados, principais agentes causadores da compactação, o que diminui o diâmetro dos poros do solo, aumenta os microporos (< 0.03 mm) e a resistência a penetração de raízes (Sato et al., 2017; Zuraidah, 2019). Sato et al. (2017) relataram que o intervalo hídrico ótimo para o crescimento da palma de óleo diminuiu com o aumento da resistência a penetração em função de aumentos na densidade do solo na zona de tráfego agrícola.

No agroecossistema da palma de óleo são formadas zonas de manejo, que se diferem pela influência do tráfego de máquinas e deposição de material orgânico, fato que desencadeia heterogeneidade das propriedades do solo (de Oliveira et al., 2022). O advento da mecanização (retirada dos cachos colhidos da área) atrelada ao uso de máquinas cada vez mais pesadas é objeto de preocupação, tendo em vista que a colheita ocorre a cada 21 dias e as condições do solo, como a friabilidade, nem sempre são consideradas para a realização da atividade.

A friabilidade corresponde a tendência dos agregados do solo de se desfazerem em tamanhos menores sob a aplicação de um estresse (Utomo e Dexter, 1981), algo difícil de verificar em campo, por isso, a umidade em que o solo está friável pode ser considerada como o conteúdo de água ótimo para as operações de preparo (θ_{OPT}), derivado da curva de retenção

de água no solo (Dexter et al., 2008; Dexter e Richard, 2009). Dentro deste contexto, conceitos relacionados a trabalhabilidade e trafegabilidade do solo devem ser esclarecidos e difundidos nas regiões produtoras, sendo a trabalhabilidade a capacidade do solo suportar operações de preparo, e a trafegabilidade a capacidade do solo suportar o tráfego agrícola, sem comprometimento a estrutura do solo e compactação adicional (Hu et al., 2023).

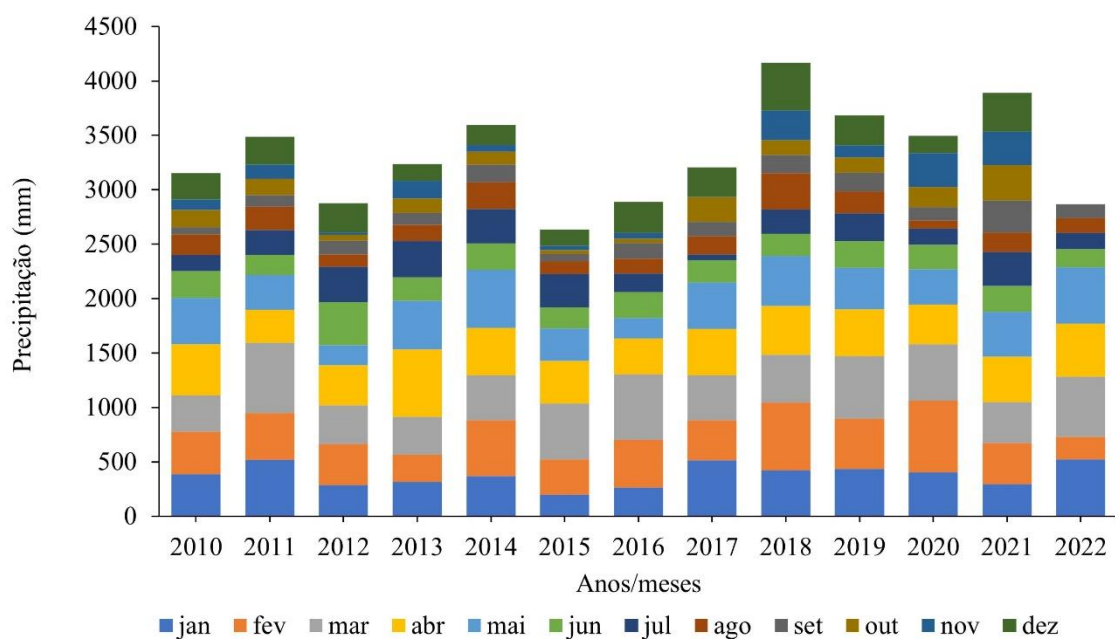
Os efeitos das zonas de manejo na trabalhabilidade/trafegabilidade do solo são pouco discutidos na literatura (Obour et al., 2017, de Oliveira et al., 2022), assim, o objetivo desse artigo foi estimar a faixa de conteúdo de água limitante ao processo de compactação induzido por operações mecanizadas. As hipóteses sugeridas foram (i) a densidade do solo e o carbono orgânico impactam faixa de conteúdos de água limitantes para operações mecanizadas em plantios com palma de óleo; e a (ii) variação temporal da umidade do solo influencia no peso de cachos de frutos frescos.

2 Material e métodos

2.1 Localização e caracterização da área

O estudo foi desenvolvido em três áreas com híbrido interespecífico da palma de óleo (*Elaeis guineenses* Jacq. x *Elaeis Oleifera* (H.B.K.) Cortés) no município de Santa Bárbara, região Metropolitana de Belém, Pará, Brasil, 1° 13' 27" S e 48° 17' 38" O, sob clima equatorial úmido Af, segundo Koppen. Nesta região a precipitação total de julho de 2021 a julho de 2022 foi 4377,90 mm (Período avaliado) com o total de 145 mm no mês mais seco (julho 2022) e 554,20 mm no mês mais chuvoso (março 2022), apresentando temperatura média anual 26,7° C (Figura 1).

Figura – 1 Precipitação anual e mensal durante janeiro de 2010 e dezembro 2022 dos plantios com palma de óleo no município de Santa Barbara, Pará, Amazônia Oriental



O solo foi classificado como Latossolo Amarelo distrófico com caráter plúntico (Santos et al., 2018). A distribuição de partículas (Gee and Bauder, 1986) e fracionamento da areia até 0,60 m de profundidade estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Classe textural e distribuição granulométrica de solos cultivados com híbridos de palma de óleo em Santa Bárbara, Estado do Pará, Brasil. (Média \pm Desvio padrão).

| Área | P1 | P2 | P3 |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 0-0,20 m | | |
| Classe textural | Franco arenoso | Areia franca | Areia franca |
| Argila (g kg ⁻¹) | 119,18 \pm 16,03 | 121,61 \pm 10,64 | 109,28 \pm 10,63 |
| Silte (g kg ⁻¹) | 71,05 \pm 2,58 | 48,82 \pm 11,93 | 29,62 \pm 11,46 |
| Areia total (g kg ⁻¹) | 809,77 \pm 13,48 | 829,57 \pm 20,58 | 861,09 \pm 14,44 |
| Areia grossa (g kg ⁻¹) | 102,90 \pm 13,49 | 111,41 \pm 8,84 | 91,77 \pm 5,40 |
| Areia média (g kg ⁻¹) | 202,71 \pm 24,14 | 265,21 \pm 21,17 | 362,40 \pm 15,52 |
| Areia fina (g kg ⁻¹) | 503,77 \pm 2,85 | 455,87 \pm 14,37 | 405,99 \pm 5,42 |
| | 0,20-0,40 m | | |
| Classe textural | Franco arenoso | Franco arenoso | Franco arenoso |
| Argila (g kg ⁻¹) | 157,01 \pm 12,27 | 132,24 \pm 6,45 | 160,97 \pm 10,80 |
| Silte (g kg ⁻¹) | 92,30 \pm 26,38 | 80,23 \pm 21,08 | 25,71 \pm 9,79 |
| Areia total (g kg ⁻¹) | 750,69 \pm 25,83 | 787,54 \pm 14,82 | 813,32 \pm 2,57 |
| Areia grossa (g kg ⁻¹) | 99,25 \pm 7,17 | 132,63 \pm 43,64 | 80,00 \pm 3,89 |
| Areia média (g kg ⁻¹) | 175,70 \pm 41,09 | 254,18 \pm 25,17 | 347,57 \pm 11,71 |
| Areia fina (g kg ⁻¹) | 479,01 \pm 17,47 | 448,51 \pm 21,38 | 384,52 \pm 9,60 |
| | 0,40-0,60 m | | |
| Classe textural | Franco arenoso | Franco arenoso | Franco arenoso |
| Argila (g kg ⁻¹) | 164,12 \pm 14,39 | 150,25 \pm 28,72 | 157,24 \pm 11,26 |
| Silte (g kg ⁻¹) | 56,15 \pm 13,59 | 90,15 \pm 24,19 | 55,29 \pm 22,90 |
| Areia total (g kg ⁻¹) | 779,74 \pm 14,04 | 759,60 \pm 4,54 | 787,47 \pm 11,67 |
| Areia grossa (g kg ⁻¹) | 94,86 \pm 4,64 | 98,15 \pm 4,55 | 103,14 \pm 38,41 |
| Areia média (g kg ⁻¹) | 162,51 \pm 38,85 | 220,45 \pm 17,67 | 278,49 \pm 17,18 |
| Areia fina (g kg ⁻¹) | 468,39 \pm 16,35 | 437,29 \pm 15,82 | 427,01 \pm 9,17 |

As áreas estudadas começaram a ser cultivadas com palma de óleo na década de 1960. Para o plantio das áreas foi realizado aração e gradagem do solo, calagem e adubação. A área 1 foi renovada em 1999, área 2 em 2013 e o área 3 foi renovada em 2017. Para facilitar a escrita do artigo foi considerado para área 1, 2 e 3 as siglas P1, P2 e P3, respectivamente.

As operações agrícolas frequentes nas áreas foram: adubação de uma a duas vezes ao ano; controle de plantas invasoras com a roçadeira (três vezes ao ano), e com herbicida (seis vezes ao ano, intercalando os meses); cambitagem mecanizada a cada 21 dias. A cambitagem consiste na retirada dos cachos colhidos dos talhões mecanicamente com uma garra acoplada ao trator com carroça.

2.2. Amostragem do solo

Em cada área de cultivo selecionada, a amostragem foi realizada em três zonas de manejo: coroamento (P), distante 2,4 m da planta avaliada, conforme Peralta et al. (1985); linha de plantio (EL); e a zona de tráfego agrícola (LL). A zona EL é um local de deposição das folhas cortadas no momento da colheita dos cachos. Na coleta de amostras, considerou-se profundidades até 0,60 m, pois, de acordo com Carr (2011) é a profundidade onde ocorre a maior distribuição de raízes da palma de óleo, sendo consideradas, dessa forma, as

profundidades de 0-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m. Assim, a amostragem foi realizada em 12 plantas de cada área, nas três zonas de manejo e nas três profundidades, totalizando 108 amostras.

Amostras indeformadas foram coletadas em anéis de inox de 0,05 x 0,05 m de diâmetro e altura para obtenção da curva de retenção de água e densidade do solo. As amostras deformadas foram usadas para determinação da distribuição granulométrica e textura do solo e os teores de carbono orgânico do solo. Estas amostragens ocorreram no período de março e abril de 2021. Mensalmente foi avaliada a umidade volumétrica (θ) nas zonas de manejo e profundidades estudadas, entre julho de 2021 a julho de 2022.

2.3. Determinação das propriedades físicas do solo

A distribuição do tamanho de partículas foi determinada pelo método da pipeta com uso do NaOH 1M como dispersante químico e agitação por 16 h (Gee e Bauder, 1986). As frações areia foram considerada como sendo o material retido na peneira de 0,053 mm, a argila utilizando uma alíquota de 25 ml e o silte determinado por diferença. A fração areia foi separada em areia fina (< 0.25 mm), média (0.50-0.25 mm) e grossa (2.00-1.00 mm). O carbono orgânico do solo (SOC) foi determinado pelo método Walkley Black modificado (Nelson and Sommers, 1982), utilizando o princípio da oxidação da matéria orgânica com dicromato de potássio em meio sulfúrico.

A porosidade total (TP) foi calculada a partir da densidade do solo (ρ_b) e da densidade de partícula (ρ_s) de acordo com a formula $PT = 1 - \rho_b/\rho_s$ (Embrapa, 2017). A ρ_b foi obtida a partir de amostras indeformadas de 0,05 m de diâmetro e altura, posterior secagem em estufa a 105 °C até atingir massa constante (Blake and Hartage, 1986a). A densidade das partículas (ρ_s) foi determinada pelo método do picnômetro (Blake e Hartage, 1986b). A densidade de empacotamento (PD) foi estimada com base na ρ_b e na porcentagem de argila, conforme equação 1 (Spoor et al., 2003).

$$PD = \rho_b + 0,009Argila \quad (1)$$

onde, ρ_b densidade do solo (g cm^{-3}), Argila (%).

A umidade gravimétrica (θ_g) foi medida a partir de amostras deformadas a fim de quantificar o peso da água para o cálculo da umidade volumétrica. A θ foi obtida através da equação 2:

$$\theta = \frac{\rho_b}{\rho_a} * \theta_g \quad (2)$$

onde, θ umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), ρ_b densidade do solo (g cm^{-3}), ρ_a densidade da água igual a $1,00 \text{ g cm}^{-3}$.

2.4. Estimativa do conteúdo de água limitantes para operações mecanizadas por maio da Curva de Retenção de Água (WRC)

Para a determinação da WRC, as amostras indeformadas foram saturadas por capilaridade e submetidas a diferentes potenciais matriciais em mesa de tensão. Antes de submetê-las aos potenciais, as amostras foram divididas por zona de manejo. Para cada profundidade havia 12 amostras por zona, em cada área, assim as amostras foram divididas em três grupos com quatro amostras e cada grupo foi submetido aos seguintes potenciais: -10, -20, -30, -60, -100 (grupo I); -200, -300, -400 (grupo II) e -500, -600, e -700 hPa (grupo III) em mesa de tensão (Klute, 1986). Os potenciais abaixo de -10.000 hPa foram determinados utilizando o psicrômetro (modelo WP4-T Dewpoint Potential Meter), o qual é um medidor de ponto de orvalho (Scanlon et al., 2002).

Antes de colocar as amostras no psicrômetro foi adicionado água às amostras, e posteriormente estas foram acondicionadas na geladeira por 16 h para a distribuição uniforme da umidade nas amostras. Após esse período, foram colocadas na câmara hermeticamente fechada do psicrômetro, onde a umidade da câmara entra em equilíbrio com o potencial da água no solo, que é calculado com base na temperatura do solo e do ar no ponto de orvalho (Scanlon et al., 2002). Após as leituras, as amostras foram retiradas do equipamento e pesadas em balança de precisão. Em seguida, as amostras foram levadas à estufa a 105°C por 24 h para determinação da umidade gravimétrica. A WRC foi ajustada separadamente para as zonas de manejo e profundidade.

A média do conteúdo de água (θ , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em cada potencial matricial (hPa) foi calculada ajustando a equação de van Genuchten (1980), equação 3:

$$\theta = (\theta_s - \theta_R)[1 + (\alpha h)^n]^{1-(1/n)} + \theta_R \quad (3)$$

onde, θ_s e θ_R são os conteúdos de água na saturação ($h = 0$) e conteúdo de água residual ($h = \infty$), respectivamente, α , n e m são os parâmetros do modelo, onde n é um parâmetro ajustado que controla a forma da curva e $m = 1 - 1/n$ correspondente a restrição de Mualem (1976).

O conteúdo de água no limite de preparo úmido (θ_{WTL}), ótimo (θ_{OPT}) e seco (θ_{DTL}) foram estimados conforme descrito por Dexter e Bird (2001), equação 4:

$$\theta_{WTL} = \theta_{INFL} + 0,4(\theta_s - \theta_{INFL}) \quad (4)$$

onde, θ_{INFL} conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo, θ_s é conteúdo de água na saturação. O conteúdo de água no limite de preparo ótimo (θ_{OPT}) foi estimado como o θ_{INFL} ($\theta_{OPT} = \theta_{INFL}$), utilizando a equação 5 abaixo:

$$\theta_{INFL} = (\theta_s - \theta_R)[1 + 1/m]^{-m} + \theta_R \quad (5)$$

O conteúdo de água no limite de preparo seco foi calculado com base no valor de potencial matricial no limite de preparo seco (h_{DTL}) utilizando uma metodologia proposta por Dexter et al. (2005), onde h_{DTL} foi estimado em acordo com a equação 6:

$$h_{DTL} \approx 2/\alpha [1/m]^{1/n} n^{1.1} \quad (6)$$

Aplicando h_{DTL} na equação 3 foi estimado o θ_{DTL} . A faixa de conteúdos de água para o preparo do solo ($\Delta\theta_{Ranger}$) foi obtido pela diferença entre os conteúdos de água no limite úmido e seco ($\Delta\theta_{Ranger} = \theta_{WTL} - \theta_{DTL}$) (Obour et al., 2019a).

A capacidade de campo (θ_{FC}) e ponto de murcha permanente (θ_{WP}) foram considerados como equivalente aos potenciais -100 hPa e -15000 hPa, respectivamente (Cassel and Nielsen, 1986).

2.5 Determinação do conteúdo de água do solo crítico para compactação do solo

O conteúdo de água crítico para compactação (θ_c) foi obtido a partir da curva de compactação do solo através do ensaio de Proctor Normal com reuso de material, segundo a NBR 7182 (ABNT, 1986). A densidade máxima de compactação (ρ_{bc}) em função do θ , foram ajustadas pela equação polinomial de segundo grau, 7:

$$\rho_{bc} = a\theta^2 + b\theta + c \quad (7)$$

2.6 Análise de crescimento da planta

Foram monitorados o número de cachos de frutos frescos (NFFB), comprimento do cacho (L) e peso dos cachos de frutos frescos (FFB), durante treze meses (julho/2021 a julho/2022). O ciclo de colheita foi cerca de 21 dias, como recomendado por Homma et al. (2016). A média do peso dos cachos foi obtida pela razão entre o peso total de cachos e o número de cachos colhidos por planta.

2.7 Análises estatística

A normalidade dos dados foi observada para cada profundidades através do teste Shapiro-Wilk e a homocedacidade pelo teste de Bartlett, ambos a 5% de significância. Análise de variância foi executada a fim de testar os efeitos das zonas de manejo nas variáveis do solo (separadamente para cada área e profundidade). As variáveis não normais foram normalizadas usando a função logaritmo. As variáveis físicas do solo (SOC, ρ_b , PD, TP, MiC, MaC) e os conteúdos de água nos limites de preparo, capacidade de campo, ponto de murcha e água disponível foram comparados pelo teste Tukey a 5%. O ajuste das curvas de retenção de água foi realizado utilizando o pacote *Soilphysics* presente no software R Core Team (2022). A influência da ρ_b e SOC na faixa de conteúdos de água para o preparo do solo ($\Delta\theta_{\text{Ranger}}$) foi obtida via regressão múltipla para cada área e profundidade separadamente. A relação entre a produção de cachos de frutos frescos e média de umidade do solo dos três meses anteriores ao pico de colheita foi demonstrado utilizando análise de componentes principais (PCA).

3 Resultados

3.1. Propriedades físicas do solo nas zonas de manejo

Houve diferenças estatísticas entre as zonas de manejo das áreas com híbridos de palma de óleo em diferentes profundidades ($P \leq 0,05$). Em geral, as propriedades do solo, carbono orgânico do solo (SOC), porosidade total (TP) e macroporosidade (MaC) variaram entre as zonas de manejo da seguinte forma: linha de plantio > coroamento > tráfego de máquinas (Tabela 2). Na profundidade 0-0,20 m, o SOC da área P2 na linha de plantio foi superior às zonas tráfego de máquinas e coroamento cerca de 21,46% e 21,06%, respectivamente. Os conteúdos de SOC foram superiores 61,14%, e 57,63% na linha de plantio, comparado ao tráfego de máquinas nas áreas P2 e P3, respectivamente, em 0,20-0,40 m.

Tabela 2 – Variação das propriedades físicas do solo, carbono orgânico (SOC), densidade do solo (ρ_b), porosidade total (TP), microporosidade (MiC) e macroporosidade (MaC) em zonas de manejo e profundidades de solos com híbridos de palma de óleo.

| Áreas | Zonas | SOC | ρ_b | PD | TP | MiC | MaC |
|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|------------|------------|--------------------------------|------------|
| 0-0,20 m | | g kg ⁻¹ | g cm ⁻³ | | | m ³ m ⁻³ | |
| P1 ^a | P ^d | 11,17±1,43a | 1,69±0,03a | 1,81±0,02a | 0,34±0,01a | 0,29±0,01a | 0,04±0,01b |
| | LL ^e | 12,48±1,09a | 1,64±0,02a | 1,76±0,03a | 0,47±0,08a | 0,40±0,09a | 0,07±0,04b |
| | EL ^f | 12,13±1,47a | 1,41±0,06b | 1,54±0,05b | 0,45±0,02a | 0,26±0,00a | 0,19±0,02a |
| P2 ^b | P | 11,88±0,71b | 1,44±0,12a | 1,52±0,12a | 0,40±0,01a | 0,26±0,00a | 0,14±0,00a |
| | LL | 11,82±0,13b | 1,55±0,02a | 1,53±0,11a | 0,46±0,05a | 0,28±0,02a | 0,17±0,07a |
| | EL | 15,05±0,69a | 1,44±0,11a | 1,66±0,02a | 0,44±0,04a | 0,32±0,01a | 0,12±0,02a |
| P3 ^c | P | 7,58±0,07b | 1,57±0,01a | 1,64±0,00a | 0,40±0,01b | 0,29±0,05a | 0,12±0,04a |
| | LL | 8,61±0,13a | 1,54±0,00b | 1,64±0,00a | 0,39±0,02b | 0,31±0,02a | 0,09±0,03a |
| | EL | 8,79±0,00a | 1,44±0,01c | 1,54±0,01b | 0,44±0,01a | 0,28±0,01a | 0,16±0,01a |
| 0,20-0,40 m | | | | | | | |
| P1 | P | 8,98±0,35a | 1,52±0,01b | 1,71±0,04a | 0,40±0,02a | 0,31±0,03a | 0,09±0,05a |
| | LL | 5,60±0,20b | 1,62±0,00a | 1,75±0,03a | 0,39±0,02a | 0,25±0,01b | 0,14±0,02a |
| | EL | 7,54±0,06b | 1,61±0,01a | 1,73±0,04a | 0,38±0,01a | 0,32±0,02a | 0,07±0,03a |
| P2 | P | 3,51±0,32b | 1,61±0,00a | 1,75±0,03a | 0,40±0,04a | 0,27±0,00a | 0,14±0,04a |
| | LL | 2,46±1,13b | 1,64±0,01a | 1,76±0,02a | 0,38±0,03a | 0,27±0,02a | 0,11±0,02a |
| | EL | 6,33±0,76a | 1,50±0,00b | 1,60±0,02b | 0,41±0,01a | 0,29±0,02a | 0,12±0,02a |
| P3 | P | 4,07±0,50b | 1,64±0,05a | 1,74±0,01b | 0,35±0,02a | 0,26±0,01a | 0,08±0,02a |
| | LL | 2,72±1,46b | 1,62±0,04a | 1,80±0,01a | 0,37±0,02a | 0,26±0,04a | 0,10±0,06a |
| | EL | 6,42±0,64a | 1,53±0,05a | 1,60±0,01c | 0,38±0,02a | 0,23±0,01a | 0,15±0,01a |
| 0,40-0,60 m | | | | | | | |
| P1 | P | 8,25±0,92a | 1,66±0,01b | 1,82±0,02b | 0,34±0,01a | 0,32±0,02a | 0,02±0,02a |
| | LL | 7,29±0,95a | 1,73±0,00a | 1,88±0,01a | 0,31±0,00b | 0,31±0,00a | 0,01±0,00a |
| | EL | 4,43±0,96b | 1,64±0,03b | 1,80±0,02b | 0,34±0,01a | 0,30±0,03a | 0,04±0,03a |
| P2 | P | 5,09±0,51a | 1,55±0,07a | 1,67±0,04a | 0,43±0,04a | 0,27±0,03b | 0,16±0,05a |
| | LL | 1,22±0,39b | 1,61±0,06a | 1,75±0,08a | 0,43±0,01a | 0,33±0,01a | 0,10±0,01a |
| | EL | 6,42±2,28a | 1,66±0,03a | 1,79±0,01a | 0,34±0,01b | 0,29±0,01b | 0,05±0,02a |
| P3 | P | 3,98±0,73a | 1,70±0,01a | 1,83±0,03a | 0,34±0,01a | 0,28±0,01a | 0,06±0,01a |
| | LL | 2,50±1,14a | 1,65±0,02b | 1,77±0,04a | 0,34±0,01a | 0,28±0,00a | 0,06±0,02a |
| | EL | 4,82±0,72a | 1,58±0,01c | 1,70±0,02b | 0,50±0,18a | 0,41±0,16a | 0,08±0,01a |

*As letras indicam diferenças estatísticas entre as zonas de manejo dentro de cada área (P-valor $\leq 0,05$). ^aárea 1; ^bárea 2; ^cárea 3; ^dCoroamento; ^eZona de tráfego; ^fLinha de plantio.

A zona de maior influência do tráfego e o coroamento apresentaram os maiores valores de densidade do solo (ρ_b) em todas as áreas conforme a tabela 2. Na profundidade 0-0,20 m, área P1, a ρ_b da linha de plantio foi inferior 16,57% e 14,03%, comparado ao coroamento e zona de tráfego, respectivamente. Em geral os menores valores de densidade de empacotamento (PD) estiveram na linha de plantio. Nas diferentes zonas os valores de PD aumentaram em maior profundidade do solo.

Na profundidade superficial (0-0,20 m) a porosidade total (TP) diferiu entre as zonas da área P3, sendo superior na linha de plantio, 9,09% e 11,36% comparado ao coroamento e tráfego de máquinas, respectivamente (Tabela 2). Na profundidade 0,40-0,60 m, área P1, a TP variou da seguinte forma entre as zonas, linha de plantio = coroamento > tráfego de máquinas, diferente da área P2, cuja variação foi coroamento = tráfego de máquinas > linha de plantio. Em todas as áreas e profundidades houve maior quantitativo de microporosidade (MiC) em

relação a MaC no solo. Na profundidade 0,20-0,40 m da área P1, a MiC diminuiu, 21,87%, na zona de tráfego comparado a linha de plantio. Na profundidade 0,40-0,60 m da área P2 houve aumento de 12,12% de MiC na zona de tráfego em relação a linha de plantio. Na profundidade superficial, área P1, a MaC foi superior 78,95% e 63,13% na linha de plantio, comparado ao coroamento e tráfego de máquinas, respectivamente.

3.2. Conteúdos de água limitantes para operações mecanizadas

Os conteúdos de água no solo em função do potencial matricial (h) foram relacionados (Tabela 3) usando o modelo de van Genuchten (1980). Os parâmetros das curvas de retenção (θ_R , θ_S , α , m , n) foram significativos acima de 95% de confiança ($P \leq 0,05$). Na profundidade superficial da linha de plantio houve os maiores conteúdos de água na saturação (θ_S), superiores 35,42% e 18,75%, comparados ao tráfego de máquinas das áreas P2 e P3, respectivamente. A maior retenção de água residual (θ_R) da profundidade superficial estavam na zona de tráfego de máquinas, e foi superior 40% e 50% do que na linha de plantio das áreas P1 e P2, respectivamente. Conteúdos residuais $> 0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ foram comuns em profundidades subsuperficiais (0,20-0,60 m). O parâmetro α foi diminuindo com o aumento da profundidade do solo, ao contrário do n , que aumentou em profundidade.

Tabela 3 – Parâmetros ajustados à equação de van Genuchten de retenção de água no solo, para as zonas de manejo e profundidades do solo com híbridos de palma de óleo em Santa Bárbara do Pará, Amazônia Oriental.

| 0-0,20 m | | Parametros Média±EP | | | | |
|-----------------|-----------------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|
| Áreas | Zonas | θ_R^a | θ_S^b | α^c | n^d | m^e |
| P1 ^f | P ⁱ | 0,04±0,00 | 0,35±0,02 | 0,02±0,01 | 1,31±0,02 | 0,24±0,01 |
| | LL ^j | 0,05±0,00 | 0,45±0,11 | 0,01±0,01 | 1,43±0,13 | 0,30±0,06 |
| | EL ^l | 0,03±0,01 | 0,40±0,02 | 0,04±0,01 | 1,45±0,07 | 0,31±0,03 |
| P2 ^g | P | 0,03±0,00 | 0,42±0,05 | 0,04±0,01 | 1,49±0,02 | 0,33±0,01 |
| | LL | 0,04±0,00 | 0,31±0,03 | 0,01±0,00 | 2,03±0,00 | 0,51±0,00 |
| | EL | 0,02±0,00 | 0,48±0,01 | 0,04±0,00 | 1,43±0,01 | 0,30±0,00 |
| P3 ^h | P | 0,03±0,00 | 0,41±0,02 | 0,04±0,03 | 1,43±0,07 | 0,30±0,03 |
| | LL | 0,03±0,00 | 0,39±0,02 | 0,03±0,01 | 1,35±0,01 | 0,26±0,01 |
| | EL | 0,03±0,00 | 0,48±0,02 | 0,09±0,01 | 1,32±0,02 | 0,24±0,01 |
| 0,20-0,40 m | | | | | | |
| P1 | P | 0,05±0,01 | 0,38±0,07 | 0,02±0,01 | 1,74±0,57 | 0,37±0,17 |
| | LL | 0,06±0,00 | 0,29±0,00 | 0,02±0,01 | 1,49±0,19 | 0,32±0,09 |
| | EL | 0,05±0,00 | 0,35±0,03 | 0,01±0,00 | 1,49±0,09 | 0,33±0,04 |
| P2 | P | 0,03±0,00 | 0,28±0,00 | 0,01±0,00 | 1,66±0,05 | 0,40±0,02 |
| | LL | 0,05±0,01 | 0,32±0,02 | 0,02±0,00 | 1,42±0,10 | 0,29±0,05 |
| | EL | 0,05±0,01 | 0,32±0,00 | 0,01±0,01 | 2,08±0,75 | 0,46±0,16 |
| P3 | P | 0,04±0,02 | 0,35±0,01 | 0,03±0,01 | 1,47±0,14 | 0,31±0,07 |
| | LL | 0,04±0,01 | 0,32±0,04 | 0,02±0,00 | 1,78±0,44 | 0,41±0,12 |
| | EL | 0,04±0,01 | 0,33±0,00 | 0,04±0,00 | 1,47±0,06 | 0,32±0,03 |
| 0,40-0,60 m | | | | | | |
| P1 | P | 0,07±0,00 | 0,37±0,01 | 0,01±0,01 | 1,86±0,35 | 0,44±0,09 |
| | LL | 0,07±0,00 | 0,33±0,01 | 0,01±0,00 | 1,70±0,06 | 0,41±0,02 |
| | EL | 0,06±0,01 | 0,39±0,05 | 0,02±0,01 | 1,90±0,38 | 0,45±0,12 |
| P2 | P | 0,07±0,00 | 0,30±0,04 | 0,01±0,00 | 1,65±0,08 | 0,39±0,03 |
| | LL | 0,06±0,00 | 0,37±0,03 | 0,01±0,01 | 1,55±0,01 | 0,35±0,00 |
| | EL | 0,06±0,02 | 0,33±0,03 | 0,01±0,01 | 1,73±0,03 | 0,40±0,12 |
| P3 | P | 0,07±0,01 | 0,32±0,03 | 0,01±0,01 | 1,79±0,22 | 0,43±0,07 |
| | LL | 0,06±0,01 | 0,33±0,02 | 0,01±0,00 | 1,59±0,11 | 0,37±0,05 |
| | EL | 0,06±0,01 | 0,50±0,18 | 0,02±0,00 | 2,04±0,72 | 0,45±0,16 |

^aConteúdo de água residual ($m^3 m^{-3}$); ^bConteúdo de água na saturação ($m^3 m^{-3}$); ^c α , ^d n e ^e m são parâmetros do modelo; ^fárea 1; ^gárea 2; ^hárea 3; ⁱCoroamento; ^jZona de tráfego; ^lLinha de plantio. Todos os parâmetros foram significativos ($P \leq 0,05$).

Houve diferença estatística para os conteúdos de água nos limites de preparo do solo entre as zonas de manejo de cada área ($P \leq 0,05$), principalmente na profundidade 0-0,20 m (Tabela 4), onde os conteúdos de água nos limites de preparo úmido (θ_{WTL}), seco (θ_{DTL}) e ótimo (θ_{OPT}) variaram da seguinte forma entre as zonas de manejo: linha de plantio > coroamento > tráfego de máquinas. As propriedades físicas e os conteúdos de água ficaram mais uniformes nas profundidades subsuperficiais entre as zonas de manejo de cada área.

Tabela 4 – Conteúdos de água nos limites de preparo do solo ótimo (θ_{OPT}), úmido (θ_{WTL}), seco (θ_{DTL}), capacidade de campo (θ_{FC}), ponto de murcha permanente (θ_{WP}), água disponível (θ_{AW}) em zonas de manejo e profundidades de solos com híbridos de palma de óleo em Santa Bárbara do Pará, Amazônia Oriental.

| 0-0,20 m | Zonas | θ_{OPT} | θ_{WTL} | θ_{DTL} | θ_{FC} | θ_{WP} | θ_{AW} |
|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|------------------------|
| P1 ^a | P ^d | 0,25±0,01a | 0,29±0,01a | 0,19±0,01a | 0,27±0,01a | 0,09±0,00a | 0,18±0,07a |
| | LL ^e | 0,31±0,07a | 0,36±0,09a | 0,22±0,05a | 0,37±0,09a | 0,10±0,00a | 0,27±0,01a |
| | EL ^f | 0,26±0,01a | 0,32±0,01a | 0,19±0,01a | 0,22±0,00a | 0,05±0,00b | 0,17±0,00a |
| P2 ^b | P | 0,28±0,03a | 0,33±0,04a | 0,19±0,02b | 0,22±0,00a | 0,05±0,00a | 0,17±0,00b |
| | LL | 0,19±0,02b | 0,24±0,02b | 0,10±0,01c | 0,26±0,03a | 0,04±0,00a | 0,22±0,03a |
| | EL | 0,31±0,01a | 0,38±0,01a | 0,22±0,01a | 0,27±0,01a | 0,05±0,01a | 0,22±0,01a |
| P3 ^c | P | 0,27±0,02b | 0,33±0,02b | 0,19±0,02b | 0,25±0,06a | 0,06±0,01a | 0,20±0,05a |
| | LL | 0,27±0,01b | 0,32±0,02b | 0,20±0,01b | 0,27±0,02a | 0,07±0,00a | 0,20±0,01a |
| | EL | 0,33±0,01a | 0,39±0,02a | 0,25±0,00a | 0,24±0,00a | 0,08±0,01a | 0,18±0,01a |
| 0,20-0,40 m | | | | | | | |
| P1 | P | 0,23±0,00a | 0,27±0,00a | 0,16±0,00a | 0,20±0,01a | 0,06±0,00a | 0,14±0,01a |
| | LL | 0,25±0,05a | 0,31±0,06a | 0,17±0,06a | 0,27±0,04a | 0,09±0,02a | 0,18±0,03a |
| | EL | 0,21±0,01a | 0,24±0,01a | 0,16±0,02a | 0,22±0,01a | 0,08±0,02a | 0,14±0,01a |
| P2 | P | 0,18±0,01b | 0,22±0,01b | 0,11±0,01a | 0,25±0,00a | 0,04±0,04a | 0,21±0,01a |
| | LL | 0,23±0,02a | 0,27±0,02a | 0,17±0,02a | 0,24±0,03a | 0,08±0,02a | 0,16±0,01a |
| | EL | 0,21±0,01a | 0,25±0,00a | 0,13±0,03a | 0,27±0,03a | 0,06±0,00a | 0,21±0,03a |
| P3 | P | 0,24±0,01a | 0,28±0,01a | 0,17±0,01a | 0,23±0,00a | 0,06±0,00a | 0,17±0,00a |
| | LL | 0,21±0,02a | 0,25±0,03a | 0,13±0,02a | 0,22±0,04a | 0,06±0,00a | 0,16±0,04a |
| | EL | 0,23±0,00a | 0,27±0,00a | 0,16±0,00a | 0,20±0,01a | 0,06±0,00a | 0,14±0,01a |
| 0,40-0,6 0m | | | | | | | |
| P1 | P | 0,24±0,01a | 0,30±0,01a | 0,15±0,03a | 0,29±0,04a | 0,07±0,00b | 0,22±0,04a |
| | LL | 0,22±0,01a | 0,27±0,01a | 0,15±0,01a | 0,29±0,01a | 0,08±0,00a | 0,21±0,01 ^a |
| | EL | 0,26±0,03a | 0,32±0,04a | 0,16±0,04a | 0,26±0,05a | 0,07±0,00b | 0,18±0,05a |
| P2 | P | 0,21±0,03a | 0,24±0,03a | 0,14±0,01a | 0,24±0,02a | 0,08±0,00a | 0,17±0,02a |
| | LL | 0,25±0,02a | 0,30±0,02a | 0,17±0,01a | 0,31±0,02a | 0,09±0,01a | 0,22±0,01a |
| | EL | 0,23±0,02a | 0,27±0,03a | 0,16±0,03a | 0,27±0,02a | 0,08±0,00a | 0,19±0,02a |
| P3 | P | 0,22±0,02a | 0,26±0,02a | 0,15±0,02a | 0,25±0,01a | 0,08±0,00a | 0,17±0,01a |
| | LL | 0,23±0,01a | 0,27±0,01a | 0,16±0,01a | 0,25±0,01a | 0,07±0,00a | 0,18±0,01a |
| | EL | 0,31±0,09a | 0,39±0,13a | 0,16±0,02a | 0,32±0,09a | 0,07±0,00a | 0,25±0,09a |

*As letras indicam diferenças estatísticas entre as zonas de manejo dentro de cada área (P-valor $\leq 0,05$). ^aárea 1; ^bárea 2; ^cárea 3; ^dCoroamento; ^eZona de tráfego; ^fLinha de plantio.

O θ_{OPT} frequentemente teve valores próximos a capacidade de campo (θ_{FC}), exceto na profundidade 0-0,20 m (Tabela 4). O θ_{WTL} apresentou valores superiores a θ_{FC} na profundidade 0-0,20 m e valores parecidos em subsuperfície. A umidade no ponto de murcha permanente (θ_{WP}) na área P1 foi superior até 50% na zona de tráfego de máquinas comparado a linha de plantio, profundidade 0-0,20 m. Na área P2 a água disponível (θ_{AW}) variou entre as zonas na ordem: linha de plantio = tráfego de máquinas > coroamento.

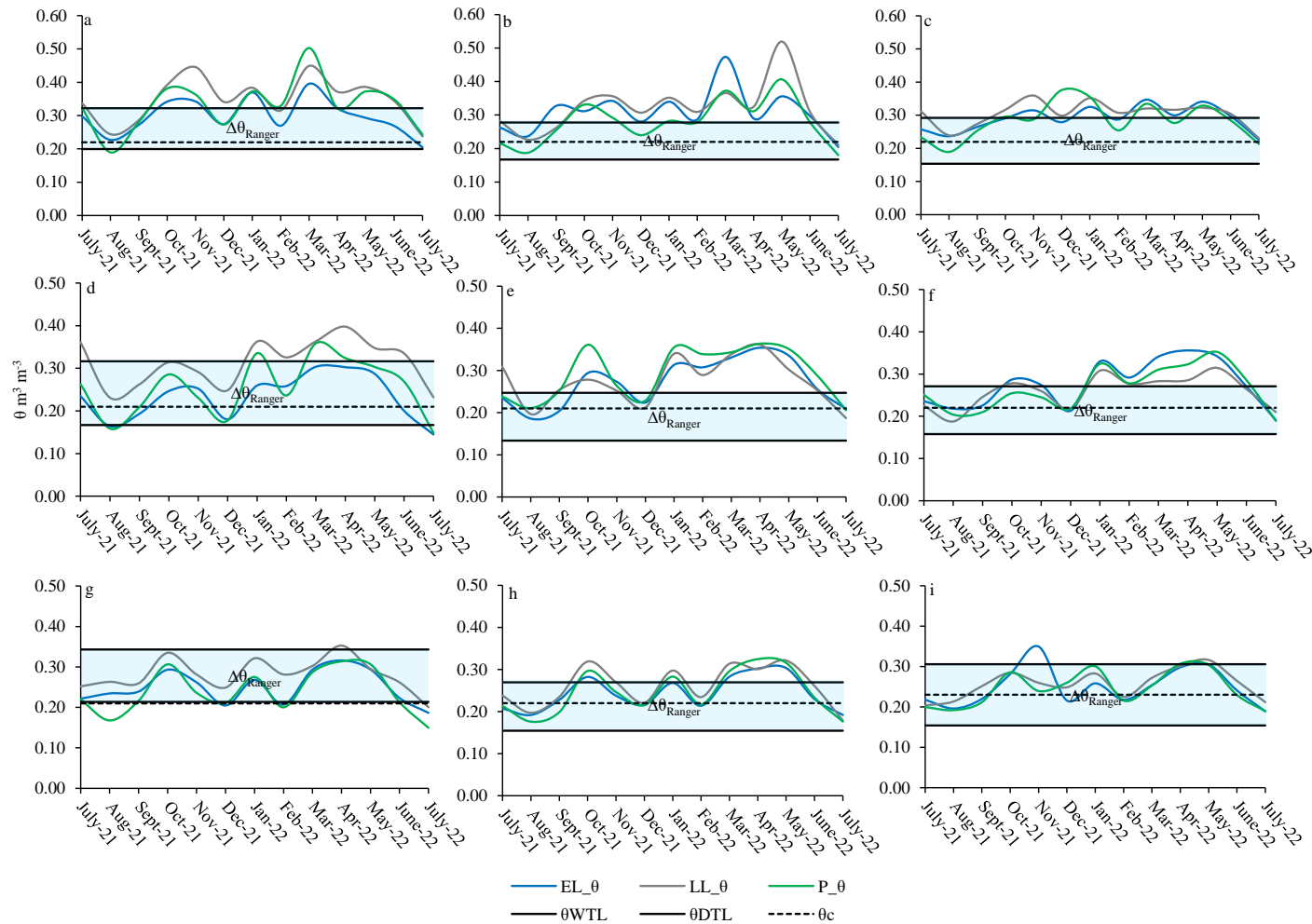
A Figura 2 mostra a variação mensal da umidade do solo nas zonas de manejo durante treze meses em relação a faixa de conteúdos de água para o preparo do solo ($\Delta\theta_{Ranger}$), e a umidade crítica para a compactação do solo (θ_c) em cada área. O $\Delta\theta_{Ranger}$ foi calculado com os valores médios de θ_{WTL} (reta superior) e θ_{DTL} (reta inferior) de cada área. A θ_c foi determinada para cada área e profundidade, independente da zona de manejo. Não houve variação da θ_c entre as profundidades nas áreas P1 e P2, que apresentaram valores médios $0,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $0,21$

$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente. Na área P3 a θ_c aumentou na profundidade 0,40-0,60 m, chegando a $0,23 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$.

Na profundidade 0-0,20 m a umidade do solo da zona de tráfego de máquinas esteve acima do θ_{WTL} nos meses de janeiro a junho de 2022 na área P2 (Figura 2d) e abril de 2022 na área P3 (Figura 2g). Na área P1 umidade do solo de todas as zonas de manejo foi superior ao θ_{WTL} entre os meses de outubro e novembro de 2021, e março e abril 2022 (Figura 2a), sendo que a zona de tráfego de máquinas permaneceu mais úmida de outubro de 2021 até junho de 2022 na profundidade 0-0,20 m. Em todas as áreas a umidade do solo das zonas de manejo excedeu o θ_{WTL} na profundidade 0,20-0,40 m durante pelo menos seis meses (Figura 2. b, e, h). Os menores $\Delta\theta_{\text{Ranger}}$ foram observados na área P1, que possui o plantio mais antigo.

Em geral, o tráfego agrícola ocorreu em umidades acima da θ_c em todas as áreas e profundidades, o que pode favorecer condições de densidade do solo máxima de compactação (ρ_{bc}), superior aos valores encontrados para estas áreas de $1,74 \text{ g cm}^{-3}$ na profundidade 0-0,20 m, e $1,90 \text{ g cm}^{-3}$ para profundidade subsuperficiais.

Figura 2 – Umidade do solo monitorada ao longo de treze meses em zonas de manejo relacionadas às faixas de conteúdos de água para preparo do solo ($\Delta\theta_{\text{Ranger}}$) e umidade crítica para a compactação (θ_c) em diferentes profundidades do solo, para as três áreas com híbridos de palma de óleo. Onde, Fig. 2. a, b, c = área 1 nas profundidades 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m; Fig. 2. d, e, f = área 2 nas profundidades 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m; Fig. 2. g, h, i = área 3 nas profundidades 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, respectivamente



3.3. Relação entre o $\Delta\theta_{\text{Range}}$, ρ_b e SOC

A influência da ρ_b e SOC na $\Delta\theta_{\text{Range}}$ foi verificada via regressão múltipla (Tabela 5). A $\Delta\theta_{\text{Range}}$ aumentou significativamente com o aumento de SOC e diminuição de ρ_b na profundidade 0,20-0,40 m no solo da área P2 ($P \leq 0,001$), e na profundidade 0,40-0,60 m no solo da área P1 ($P \leq 0,05$). Na área P3, profundidade 0,20-0,40 m, apenas o SOC foi significativo ($P \leq 0,05$). Não houve influência ρ_b e SOC no $\Delta\theta_{\text{Range}}$ na profundidade 0-0,20 m.

Tabela 5 – Regressão múltipla e coeficientes de análise para a relação entre a faixa de conteúdo de água adequada ao preparo e o carbono orgânico e densidade do solo com híbrido de palma de óleo: $\Delta\theta_{\text{Range}} = b_0 + b_1\text{SOC} + b_2\rho_b$. Onde, SOC: carbono orgânico do solo; ρ_b : densidade do solo; $\Delta\theta_{\text{Range}}$: Faixa de conteúdo de água para o preparo do solo; b_0 , b_1 e b_2 são coeficientes de regressão.

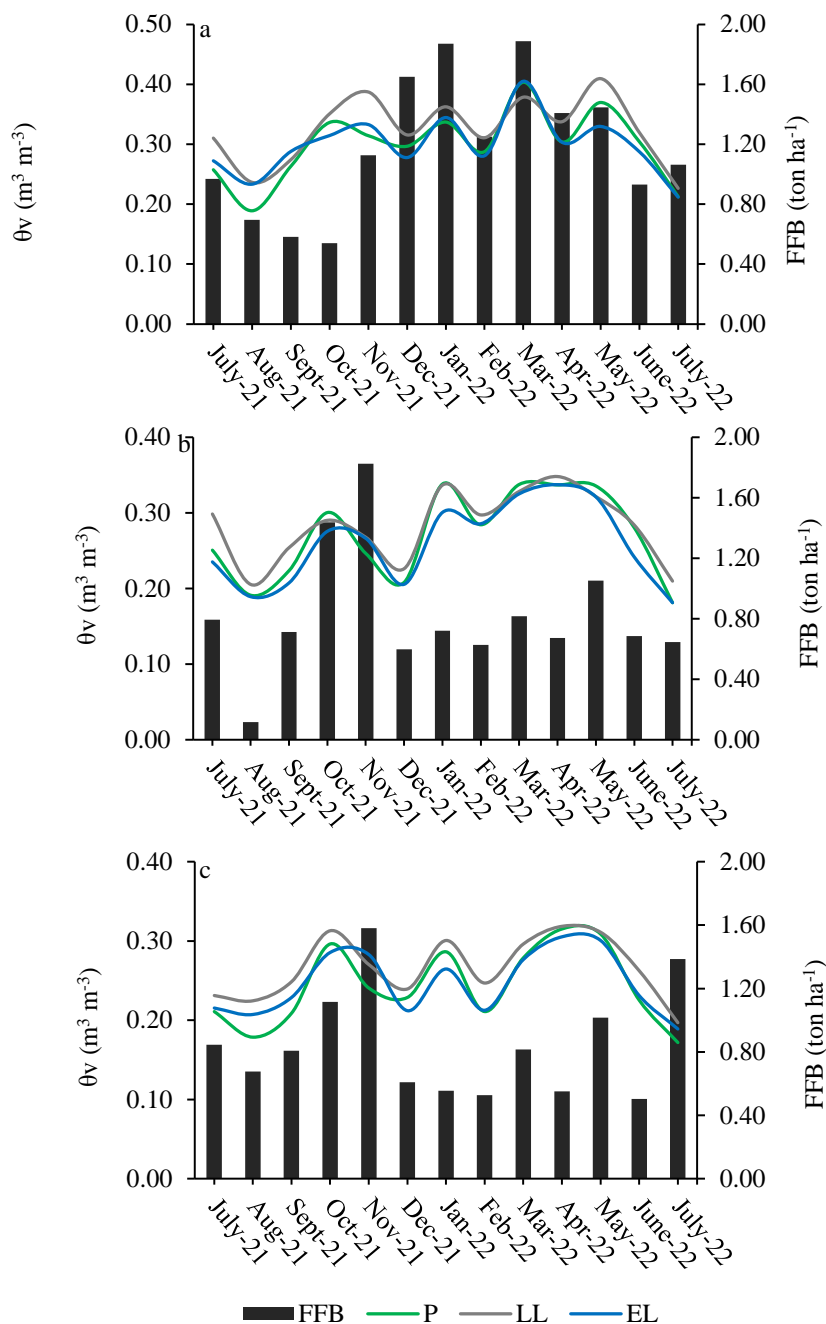
| Camada m | Áreas | Coeficientes | | | Anova | | |
|-----------|-------|-------------------|----------------------|--------------------|-------|-------|-----------|
| | | b_0 | b_1 | b_2 | R^2 | F | P-valor |
| 0-0,20 | P1 | $0,23 \pm 0,41$ | $-0,06 \pm 0,33$ | $-0,23 \pm 0,45$ | 0,04 | 1,13 | 0,88 |
| | P2 | $-0,05 \pm 0,09$ | $0,16 \pm 0,07$ | $0,12 \pm 0,15$ | 0,45 | 2,45 | 0,17 |
| | P3 | $0,19 \pm 0,15$ | $0,03 \pm 0,12$ | $-0,53 \pm 0,38$ | 0,36 | 1,69 | 0,26 |
| 0,20-0,40 | P1 | $0,25 \pm 0,24$ | $0,09 \pm 0,10$ | $-1,06 \pm 1,11$ | 0,25 | 1,00 | 0,43 |
| | P2 | $0,09 \pm 0,03^*$ | $0,16 \pm 0,03^{**}$ | $-0,50 \pm 0,15^*$ | 0,86 | 18,16 | 0,00^{**} |
| | P3 | $0,17 \pm 0,08$ | $-0,07 \pm 0,03^*$ | $-0,07 \pm 0,34$ | 0,62 | 4,84 | 0,05^* |
| 0,40-0,60 | P1 | $0,46 \pm 0,17^*$ | $0,001 \pm 0,05$ | $-1,46 \pm 0,61^*$ | 0,62 | 4,85 | 0,05^* |
| | P2 | $0,19 \pm 0,10$ | $-0,03 \pm 0,02$ | $-0,28 \pm 0,46$ | 0,24 | 0,96 | 0,44 |
| | P3 | $-0,02 \pm 0,67$ | $0,04 \pm 0,19$ | $0,72 \pm 3,18$ | 0,02 | 0,06 | 0,95 |

***, **, * Significativo a 0.1%, 1% 5%, respectivamente.

3.4. Relação entre a umidade do solo e a produção de cachos de frutos frescos

O peso de cachos de frutos frescos (FFB) variou nas três áreas ao longo dos meses de monitoramento (Figura 3). A área P1 apresentou picos máximos nos meses de janeiro e março de 2022; em novembro de 2021 ocorreu os picos máximo das áreas P2 e P3. Os menores picos de produção para as áreas P1, P2 e P3 foram em outubro/2021, agosto/2021 e junho/2022 com diminuição de 71,43%, 93,45% e 68,36%, respectivamente, comparado aos maiores picos.

Figura 3 – Peso médio do cacho de frutas frescas (FFB) em relação à umidade do solo nas zonas de manejo até 0,6 m de profundidade durante o período de avaliação, julho de 2021 a julho de 2022. Fig. 3. a, b e c correspondem as áreas 1, 2 e 3



A relação entre a umidade do solo e a produção de cachos de frutos frescos foi demonstrada pela análise de componentes principais (PCA). Nesta análise multivariada, as componentes principais, PC1 e PC2, explicaram 60,02% da variabilidade total dos dados (Tabela 6). A PC1 explicou 34,3% da variabilidade dos dados, e foi constituído pelas umidades do solo nas profundidades 0-0,20 m (Uv_20), 0,20-0,40 m (Uv_40) e 0,40-0,60 m (Uv_60), que

apresentaram correlação positiva; o número de cachos de frutos frescos (NFFB) e peso cachos de frutos frescos (FFB) foram correlacionados negativamente (Figura 4)

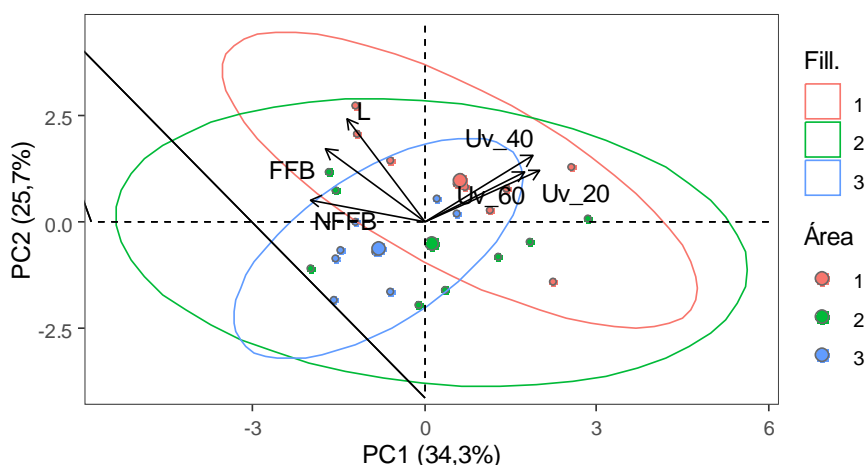
Tabela 6 – Resumo da análise multivariada de características produtivas de híbridos de palma de óleo e umidade do solo até 0,60 m.

| Componentes principais | PC1 ^a | PC2 | PC3 | PC4 |
|------------------------|------------------|-------|-------|-------|
| Autovalor | 2,05 | 1,54 | 0,97 | 0,65 |
| Variância explicada | 35,29 | 25,73 | 16,22 | 10,81 |
| Variável | Correlação | | | |
| NFFB ^b | -0,65 | 0,17 | 0,59 | 0,30 |
| FFB ^c | -0,56 | 0,56 | -0,43 | -0,20 |
| L ^d | -0,44 | 0,80 | -0,00 | -0,01 |
| Uv_20 ^e | 0,65 | 0,39 | -0,41 | 0,28 |
| Uv_40 ^f | 0,61 | 0,51 | 0,27 | 0,35 |
| Uv_60 ^g | 0,56 | 0,38 | 0,44 | -0,56 |

^aComponente principal; ^bNúmero de cachos de frutos frescos por planta; ^cCachos de frutos frescos; ^dComprimento dos cachos de frutos frescos; ^eUmidade volumétrica na profundidade 0-0,20 m; ^fUmidade volumétrica na profundidade 0,20-0,40 m; ^gUmidades volumétrica na profundidade 0,40-0,60 m.

Na PC2 a variabilidade explicada foi de 25,73%, onde todas as variáveis foram correlacionadas positivamente, sugerindo que a umidade do solo favoreceu o FFB (Figura 4). A PCA separou as áreas de maior produção de cachos, onde as elipses que representam P1 e P2 coincidiram, indicando que estas áreas tiveram comportamentos produtivos parecidos. A produção da área P3 foi próximo ao observado em P2, porém não coincidiu com P1.

Figura 4 – Dimensões multivariadas das variáveis de crescimento no pico de produção (novembro, dezembro e janeiro) e umidade do solo nas áreas com palma de óleo em Santa Bárbara do Pará, Amazônia Oriental. Biplot mostrando as variáveis de crescimento nas áreas de idades diferentes: círculo vermelho (área P1, ano 1999), círculo verde (área P2, ano 2013) e círculo azul (área P3, ano 2017). Onde, NFFB é o número de cachos de frutos frescos por planta; L é o comprimento dos cachos de frutos frescos; FFB, cachos de frutos frescos; Uv_20, Uv_40 e Uv_60 são as umidades volumétricas nas profundidades 0-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente



4 Discussão

As propriedades físicas do solo indicaram a condição atual das áreas com híbridos de palma de óleo, com tratos culturais que induzem a formação de zonas de manejo, em especial na profundidade superficial do solo. Estudos anteriores também relatam o impacto das zonas de manejo nas propriedades físicas do solo com palma de óleo na Amazônia (Sato et al., 2017; De Oliveira et al., 2022; Costa et al., 2023). As zonas linha de plantio e coroamento apresentaram as melhores condições físicas do solo, em geral com os maiores conteúdos de carbono orgânico, porosidade total e macroporosidade.

Nas zonas linha de plantio e coroamento, a entrada de matéria orgânica ocorre por quatro vias: deposição de folhas provenientes da poda; ação do sistema radicular, próximo ao estipe; adubação orgânica com 20 ton ha⁻¹ ano⁻¹ de cachos vazios de palma (Engaços), espalhados uniformemente por todas as zonas; e ausência do tráfego de máquinas. A deposição orgânica pode aumentar a macroagregação, contribuindo para a maior porosidade total e diminuição da densidade do solo (Souza et al., 2019). Os materiais orgânicos atuam como agentes cimentantes, formando agregados no solo (Torres et al., 2019; Enck et al., 2022). Em síntese, o aporte de material orgânico e a ausência de pressões do tráfego agrícola resultam em melhor qualidade de solo, em especial na linha de plantio, que recebeu a deposição de pedúnculos e folhas de palma de óleo.

Na zona de coroamento a maior atividade radicular da palma de óleo configura uma importante entrada de carbono no solo (Ramos et al., 2018; Costa et al., 2023). O sistema radicular da palma de óleo é fasciculado e sua maior concentração ocorre próximo ao estipe (Corley and Tinker, 2015), fato que também influenciou melhoria na qualidade física na zona de coroamento da palma de óleo em sistemas agroflorestais na Amazônia (de Oliveira et al., 2022).

Os maiores valores de densidade do solo e densidade de empacotamento foram observados na zona de tráfego. As atividades de tráfego para o manejo da cultura ocorrem periodicamente para a cambitagem dos cachos, adubação e roçagem. A zona de tráfego agrícola é relatada em estudos, como a região onde repetidas passagens de máquinas e implementos contribuem para a diminuição do espaço poroso (Torres et al., 2019, Castioni et al., 2021; Jimenez et al., 2021; Hu et al., 2023), o que explica o aumento da microporosidade e diminuição da macroporosidade, em especial na área que está a 21 anos sem aeração mecânica do solo.

A densidade do solo também foi influenciada pela textura, areia franca e franco arenoso. Naturalmente, os solos arenosos apresentam densidade do solo mais elevadas, comparado aos

argilosos, porque as partículas de areia têm maior dificuldade de arrançamento e formação de agregados, assim o aumento da matéria orgânica nestes solos pode melhorar o quantitativo de cargas negativas, favorecendo a agregação do solo (Sena et al., 2023; Pinto et al., 2022). O aumento de microporosidade, densidade do solo e densidade de empacotamento são evidências do comprometimento físico do solo, principalmente na zona de tráfego de máquinas.

A densidade de empacotamento é maior em maiores profundidades devido às maiores contribuições da argila, tornando esses solos mais suscetíveis à compactação adicional em condições úmidas. Esse método é simples e avalia a vulnerabilidade dos solos à compactação adicional em diferentes níveis de umidade (Hu et al., 2023). Durante os meses monitorados, a umidade dos solos permaneceu acima da capacidade de campo, indicando alta e moderada vulnerabilidade à compactação induzida pelo tráfego, segundo a classificação de Spoor et al. (2003). Solos arenosos têm baixa capacidade de campo devido à sua baixa retenção de água (Wang et al., 2021). O tráfego agrícola diminui a macroporosidade do solo, prejudicando sua drenagem (Santos et al., 2021). Além disso, chuvas volumosas e frequentes aumentam a umidade do solo além da capacidade de campo, pois não há tempo suficiente para a drenagem adequada.

Os conteúdos limitantes de água estabelecidos através dos parâmetros da equação de van Genuchten (θ_R , θ_S , α , m , n) apresentaram alta variabilidade dentro das áreas e zonas de manejo na superfície, mas estavam dentro das amplitudes de solos arenosos cultivados, conforme Fidalski and Tormena (2007) e Devine et al. (2022). Os maiores conteúdos de água na saturação ocorreram na linha de plantio, demonstrando influência positiva do carbono orgânico na retenção de água (Dlapa et al., 2020). Os compostos orgânicos contêm substâncias porosas capazes de armazenar grandes quantidades de água e nutrientes, aumentando a capacidade de retenção de água em solos arenosos (Wei et al., 2023; de Oliveira et al., 2022).

Na profundidade superficial, maiores valores de α são associados à entrada mais rápida de ar após o início do processo de drenagem. Esse efeito foi impulsionado pela maior proporção de areia total ($> 80,97\%$), bem como, maiores porcentagens de areia fina e média ($> 80,91\%$) dentro da fração areia total, o que influenciou valores elevados de umidade residual. Estudos anteriores têm corroborado a importância da textura do solo na retenção de água (Parahyba et al., 2019; Yang et al., 2023). Embora os solos com cultivo de palma de óleo sejam arenosos, o tamanho das partículas de areia desempenhou um papel importante para a retenção de água, ao contrário do que é observado em solos arenosos com predomínio de areia grossa.

Os conteúdos de água ótimo (θ_{OPT}), úmido (θ_{WTL}) e seco ao preparo do solo (θ_{DTL}) em geral foram menores na zona de tráfego agrícola, associado à maiores densidades do solo e menores conteúdos de carbono orgânico, fato também relatado nos estudos de Dexter and Bird, (2001); Obour et al., (2018). Estes conteúdos indicam os limites de segurança para a realização de operações de revolvimento do solo (aração, gradagem, subsolagem, escarificação e incorporação de fertilizantes), sem comprometer a estrutura, informação útil em caso de renovação de plantio de palma.

O θ_{OPT} é o limite ideal para o preparo do solo, este conteúdo esteve geralmente próximo a capacidade de campo. No θ_{OPT} pode-se alcançar a máxima friabilidade do solo, ou seja, é o conteúdo de água no qual ocorre a maior fragmentação do solo em agregados pequenos durante o preparo (Utomo and Dexter, 1981; Obour et al., 2017). Os θ_{WTL} que estavam acima da capacidade de campo, foram relacionados e produziram uma razão $\theta_{WTL}/\theta_{FC} < 1$, indicando que o solo drenará após a chuva para um conteúdo de água em que nenhum dano estrutural excessivo aconteça após o preparo (Dexter e Bird, 2001).

O conteúdo de água na capacidade de campo ou 95% dele foi considerado como ideal para a trafegabilidade de solos arenosos no estudo de Devine et al., (2022), no entanto, os autores discorrem que estimativas com base na curva de retenção de água para solos de baixa plasticidade são conservadoras, porque levam em conta a drenagem de uma pequena amostra de solo, sendo que no campo, o conteúdo de água na capacidade de campo não é alcançado apenas pela drenagem (Pecan et al., 2023). Isso não quer dizer que os métodos usados com base na curva de retenção estão fora dos padrões da ciência do solo.

A umidade do solo esteve acima do θ_{WTL} durante os meses chuvosos, especialmente nas áreas P1 e P2. Esse comportamento foi atípico para as condições de clima da região, tendo em vista que choveu acima de 300 mm nos meses de menor precipitação. Essa condição, contribuiu para que estes solos permanecessem com umidade acima do θ_{WTL} por períodos prolongados. Condições climáticas diferentes ocorreram em anos anteriores, 2010 a 2020, onde a precipitação mensal foi inferior a 200 mm.

O θ_{WTL} representa o limite máximo para ações de revolvimento do solo. O preparo acima do θ_{WTL} pode levar a deformações plásticas, reduzindo a força de cisalhamento do solo, causando perda de porosidade, redução da continuidade dos poros e formação de torrões. Condições anaeróbicas podem surgir quando o solo estiver úmido, e excessivamente duro quando seco (Obour et al., 2019a). Além disso, o preparo acima do θ_{WTL} promove a instabilidade da argila e aumento da argila dispersa (Lipiec et al., 2018), porque as ligações

entre as partículas de solo são facilmente quebradas em condições úmidas, resultando em ruptura da estrutura do solo (Schjønning et al., 2012). Assim, a produção de palma em solos arenosos é um desafio, devido ao baixo teor de cargas negativas e à maior presença de ligações fracas nesses solos.

Durante os meses de agosto/2021, junho e julho de 2022, a precipitação mensal ficou abaixo de 181 mm, com temperaturas superiores a 26 °C. Essas condições favoreceram a ocorrência de valores umidades do solo inferiores ao θ_{DTL} , possivelmente devido a maior taxa de evaporação. O preparo do solo com umidade abaixo θ_{DTL} requer maior gasto de energia específica devido à maior resistência relativa do solo, provocando alta fragmentação de partículas e formação de poeira, que contribuem para o selamento superficial (Obour et al., 2019a; Carretta et al., 2021).

Em nosso estudo não houve ampla faixa de conteúdos de água para o preparo do solo ($\Delta\theta_{Range}$), diferente de outros resultados para solos arenosos, que discorrem que estes solos podem ser trabalhados em ampla faixa de umidade, desde que ocorra livre drenagem (Müller et al., 2011; Obour et al., 2017). A dificuldade de drenagem observada nos solos com palma de óleo esteve relacionada a diminuição da porosidade e aumento da densidade provocada pelo tráfego agrícola.

A menor $\Delta\theta_{Range}$ na profundidade de 0,20-0,40 m das áreas esteve associado ao baixo conteúdo de carbono orgânico e alta densidade do solo. A área com a $\Delta\theta_{Range}$ mais restrita foi a P1, associado possivelmente ao efeito cumulativo do tráfego agrícola. A $\Delta\theta_{Range}$ refletiu a trabalhabilidade do solo (Hu et al., 2023), sendo importante para o suporte de gestão do manejo, visando otimizar operações de preparo, considerando a umidade como o fator de diminuição ou aumento da janela de oportunidade.

A relação linear entre o carbono orgânico e a $\Delta\theta_{Range}$ em profundidades subsuperficiais sugere que o aumento no conteúdo de carbono orgânico em todas as zonas de manejo, pode ampliar a janela de oportunidade para operações de preparo, bem como diminuir a densidade do solo. Essa hipótese também foi corroborada nos estudos de Dexter and Bird (2001) e Obour et al. (2018).

Nas condições da Amazônia, as altas temperaturas, precipitações e umidade elevada são fatores que aceleram significativamente as reações de decomposição orgânica no solo (Ramírez et al., 2020). Devido essa intensificação, sugere-se o aporte contínuo de material orgânico de alta qualidade para esses solos. A matéria orgânica apresenta características físicas, como baixa densidade e extensa área de superfície específica, que exercem um impacto positivo na estrutura

do solo, especialmente em solos de textura mais arenosa (Castioni et al., 2018; Dlapa et al., 2020). Além disso, a matéria orgânica pode atenuar os efeitos do tráfego agrícola (Cherubin et al., 2021).

A umidade crítica de compactação foi calculada como indicadora da vulnerabilidade do solo a compactação induzida pelo tráfego agrícola, uma vez que coincide com a densidade máxima para compactação. Os presentes resultados mostraram que entre setembro/2021 e maio/2022 houve tráfego agrícola em umidade acima da umidade crítica de compactação. O tráfego sucessivo incrementa a densidade do solo, mesmo que as tensões aplicadas sejam menores que a primeira passagem de máquina (Santos et al., 2021). Esses incrementos de densidade do solo podem exceder a capacidade de carga desses solos, levando a estados mais severos de compactação, na zona de tráfego agrícola (Castioni et al., 2021). Na zona de tráfego da área P1, profundidade 0,40-0,60 m a densidade do solo foi próximo a densidade máxima de compactação, sinalizando maior comprometimento físico do solo.

Os efeitos do tráfego agrícola são percebidos pelo acúmulo de água na superfície dos solos estudados, associados a redução dos macroporos e descontinuidade dos poros, que reduzem a porosidade de aeração, levando a diminuição da difusão de oxigênio, necessário ao desenvolvimento das plantas (Longepierre et al., 2021; Castioni et al., 2021; Santos et al., 2021).

Os dias úteis em que o solo pode ser trabalhado/trafegado são influenciados por fatores internos (conteúdo de água, textura, carbono orgânico, densidade do solo) e externos (clima, sistema de cultivo e gestão) ao solo (Edwards et al., 2016; Obour et al., 2017; Hu et al., 2023). Nas regiões tropicais a precipitação é o fator de maior influência na janela de oportunidade para operações mecanizadas. Como a palma de óleo é uma espécie típica de região tropical, plantios altamente produtivos estão sob precipitação média anual superior a 2000 mm (Ramanho Filho et al., 2010), por isso é imprescindível considerar a umidade do solo no programa de manejo da cultura.

O peso dos cachos de frutos frescos, número de cachos e comprimento variaram ao longo do período monitorado e foram influenciados pela umidade do solo. Os maiores picos produtivos coincidiram com o período de máxima colheita do híbrido da palma de óleo na Amazônia (novembro a janeiro). As variações na produção de palma de óleo são influenciadas pela precipitação e temperatura do ar, pois a cultura não se desenvolve bem em condições de chuva inferiores a 100 mm mensais (Gonçalves et al., 2010; Ramalho Filho et al., 2010; Carr, 2011; Fonseca et al., 2018).

A análise multivariada mostrou a alta variação produtiva, indicando que as áreas mais antigas foram mais produtivas em virtude do estabelecimento do ciclo produtivo, que ocorre do sexto ao décimo ano (Corley e Tynker, 2015). Além disso, nessas áreas os solos foram mais úmidos, e apresentaram os maiores números de cachos e peso de cachos de frutos frescos. Não comparou-se as áreas quanto a produção de cachos de frutos frescos, mas observou-se que o número de cachos por planta foi superior na área mais nova, e a média de cachos de frutos frescos por planta foi maior na área mais antiga, que teve a maior estabilidade produtiva.

A produção de palma de óleo foi favorecida pela média mensal de precipitação em 2020 e 2021, comportamento que está em acordo com zoneamento agroecológico da palma (Ramalho Filho, 2010). No entanto, a alta frequência e volume de chuvas excederam a capacidade de água disponível do solo ($\pm 114,70$ mm) nos meses mais chuvosos, o que limitou o tráfego agrícola para cambitagem dos cachos. Condições de alta umidade no solo aumentam os riscos de compactação, e induzem restrição ao crescimento de diversas espécies vegetais (Yu et al., 2021; Santos et al., 2021). Os presentes resultados sugerem certa resistência da palma de óleo à períodos prolongados de alagamento, o que pode ser atribuído a origem genética do híbrido da palma de óleo em áreas alagadas às margens de rios (Corley e Tynker, 2015), tanto na África (*Elaeis guineensis* Jacq.), como na América do Sul (*Elaeis oleifera*).

A alta precipitação em períodos que naturalmente são mais secos foram influenciadas pelos eventos da La Niña, que iniciaram em setembro/2020 e continuaram até maio/2022. A La Niña impacta o Brasil através do aumento da precipitação nas regiões Norte e Nordeste (NOAA, 2023). Pode-se dizer que o cenário climático favoreceu a produção de cachos de frutos frescos, no entanto, condicionou maior vulnerabilidade dos solos à compactação induzida pelo tráfego agrícola.

Em outro cenário climático, houve déficit hídrico nas áreas estudadas, que representam queda de 40% da produção de cachos de frutos frescos em 2016 atribuída à precipitação inferior a 67 mm (Abrapalma, 2016). As maiores perdas ocorreram em plantios jovens devido ao maior abortamento de inflorescência feminina (Carr, 2011). Esse déficit hídrico foi associado ao El Niño, que provocou prolongados períodos de estiagem na Amazônia. A cada 100 mm de déficit hídrico pode haver perdas em produtividade de 10% a 20% de cachos (Carr et al., 2011; Culman et al., 2019). Estudos anteriores relataram o efeito do déficit hídrico na variação temporal de cachos de frutos frescos na palma africana (Sato et al., 2017).

A umidade do solo foi relacionada a produção de cachos de frutos frescos por conta da sua influência direta nas propriedades físicas do solo ligadas ao desenvolvimento de plantas

(densidade e porosidade do solo), porém estas variáveis são estáticas, e foram avaliadas no início do estudo, assim como a $\Delta\theta_{\text{Range}}$. As variáveis estáticas não são adequadas para estudar a influência de propriedades do solo na produção de palma de óleo (Benjamin et al., 2003), sendo sugerido por estudos anteriores na Amazônia a inclusão da variação temporal da umidade do solo como variável preditora da produção de cachos de frutos frescos (Sato et al., 2017).

A implementação do cronograma de tráfego controlado, alternância de pistas e aporte contínuo de matéria orgânica podem melhorar a qualidade física desses solos. O aumento do carbono orgânico pode ser induzido através do manejo mais efetivo de plantas de cobertura, uso de espécies descompactadoras, que possam auxiliar no aumento de macroporos. Ademais, o retorno mais efetivo de engajo para as áreas, além de incrementar a fertilidade do solo podem melhorar a qualidade física (Tao et al., 2018; Noiroto et al., 2022; Formaglio et al., 2021), atenuando os efeitos do estresse provocado pelas máquinas agrícolas. Além disso, propõe-se que, com a umidade do solo fora do $\Delta\theta_{\text{Ranger}}$ o uso de cabos de aço, para o transporte dos cachos até a margem dos talhões, visando conservar a qualidade física do solo.

5 Conclusão

As zonas de manejo influenciaram as propriedades físicas do solo e os conteúdos de água limitantes ao preparo principalmente na profundidade 0-0,20 m. Os maiores conteúdos de carbono orgânico contribuíram para maior porosidade e menor densidade do solo na linha de plantio, resultando em maiores conteúdo de água limitantes ao preparo ótimo, úmido e seco. A densidade do solo e o carbono orgânico influenciam a faixa de conteúdos de água, para o preparo do solo arenoso com palma de óleo, em profundidades subsuperficiais.

Altos valores de densidade do solo e de empacotamento indicaram maior comprometimento da qualidade física do solo nas zonas de tráfego de máquinas no plantio com 21 anos, chegando a próximo da densidade máxima de compactação na profundidade de 0,40-0,60 m. A variação temporal da umidade do solo permitiu melhor predição da trabalhabilidade e trafegabilidade do solo, e influenciou a produção de cachos de frutos frescos.

Ações que favoreçam a deposição de material orgânico podem aumentar a qualidade física, atenuar os efeitos do tráfego de máquinas e aumentar a janela de oportunidade para realização de operações agrícolas. Os resultados obtidos podem orientar a tomada de decisão acerca da entrada de máquinas em cultivos de palma de óleo, a partir do monitoramento da umidade do solo e de informações derivadas da curva de retenção de água no solo.

Referências

- ABNT (1986) Associação Brasileira De Normas Técnicas - NBR 7182/86 Solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro. 10p.
- Abrapalma (2016) Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma. Déficit hídrico e impacto na produção de óleo de palma: Nota Técnica nº 001/2016. Belém. 13p.
- Benami A, Curran LM, Cochrane M, Venturieri A, Franco R, Kneipp J, Swartos A (2018) Oil palm land conversion in Pará, Brazil, from 2006–2014: evaluating the 2010 Brazilian sustainable palm oil production program. *Environ Res Lett* 13:34–37. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa270>
- Benjamin JG, Nielsen DC, Vigil MF (2003) Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma* 116(1-2):137–148. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00098-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00098-3)
- Blake GR and Hartage KH (1986a) Bulk density. In: Klute A, editor. *Method Soil Anal Part I Phys Mineral Methods*. 2nd ed. American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison, pp 363-375.
- Blake GR and Hartage KH (1986b) Particle density. In: Klute CA, editor. *Method Soil Anal Part I Phys Mineral Methods*. 2nd ed. American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison, pp 377-382.
- Botta GF, Becerra AT, Tourn FB (2009) Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil & Tillage Research* 103:381–386.
- Brasil (2018) Ministry of Agriculture, Livestock and Supply. *Diagnosis of Sustainable Palm Oil Production in Brazil*. Brasília: MAPA. x p. ISBN 978-85-7991-098-2
- Cassel DK, Nielsen DR (1986) Field capacity and available water. p. 901-926. In: Klute, A., ed. *Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods*. 2ed. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.

- Castioni GAF, Cherubin MR, Menandro LMS, Sanches GM, Bordonal R de O, Barbosa LC, Franco HCJ, Carvalho JLN (2018) Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: a multi-approach assessment. *Soil & Tillage Research* 184: 301–309. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.007>.
- Castioni GAF, de Lima RP, Cherubin MR, Bordonal RO, Rolim MM, Carvalho JLN (2021) Machinery traffic in sugarcane straw removal operation: Stress transmitted and soil compaction. *Soil & Tillage Research* 213: 105122. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105122>
- Carr MKV (2011) The water relations and irrigation requirements of oil palm (*Elaeis guineensis*): A Review. *Experimental Agriculture* 47:629–652. doi:10.1017/S0014479711000494
- Corley RHV, Tinker PB (2015) *The Oil Palm*. doi:10.1002/9781118953297
- Costa LRJ, de Matos GSB, Gomes, MF, Kato, OR, Castellani DC, Guedes RS, Vasconcelos SS (2023) Soil fertility in oil palm agroforestry systems in the Eastern Amazon, Brazil. *Agroforest Syst.* <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00832-4>
- da Silva AP, Tormena CA, Dias Junior M de S, Imhoff S, Klein VA (2010) Indicadores de qualidade física do solo. In: van Lier QJ, editor. *Física do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG pp 242–280.
- de Carvalho WR, Vasconcelos SS, Kato OR, Capela CJB, Castellani DC (2014) Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm-based agroforestry systems in the eastern Amazon. *Agrofor Syst* 88(2):357–368. doi:10.1007/s10457-014-9689-2
- de Oliveira RLL, Vasconcelos SS, Teixeira WG, Viana-Junior AB, Castellani DC, Kato OR (2022) Management Practices Affect Soil Carbon and Physical Quality in Oil Palm Agroforestry Systems in the Amazon. *J Soil Sci Plant Nutr.* <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00947-0>

- Dexter AR, Bird NRA (2001) Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil Tillage Res* 57: 203–212. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00154-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00154-9)
- Dexter AR, Czyz EA, Birkás M, Diaz-Pereira E, Dumitru E, Enache R, Fleige H, Horn R, Rajkaj K, de La Rosa D, Simota C (2005) SIDASS project: Part 3. The optimum and the range of water content for tillage - Further developments. *Soil Tillage Res* 82:29–37. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.01.005>
- Dexter AR, Czyz EA, Richard G, Reszkowska A (2008) A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. *Geoderma* 143:243–253. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.11.010>
- Dexter AR, Richard G (2009) Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions. *Soil Tillage Res* 103:113–118. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.001>
- Dlapa, P., Hriník, D., Hrabovský, A., Šimkovic, I., Žarnovičan, H., Sekucia, F., & Kollár, J. (2020). The Impact of Land-Use on the Hierarchical Pore Size Distribution and Water Retention Properties in Loamy Soils. *Water* 12:339. <https://doi.org/10.3390/w12020339>
- Edwards G, White DR, Munkholm LJ, Sørensen CG, Lamandé M (2016) Modelling the readiness of soil for different methods of tillage. *Soil Tillage Res* 155:339–350. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.013>
- Embrapa (2017) Manual of soil analysis methods. Teixeira PC et al., technical editors. 3. ed. Brasília: Embrapa. 574 p. ISBN 978-85-7035-771-7
- Fidalski J, Tormena CA, Alves SJ, Auler PAM (2013) Influence of sand fractions on water retention and availability in Caiuá and Paranavaí sandstone formations. *R Bras Ci Solo* 37:613–621. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300007>

- Fidalski J and Tormena CA (2007) Pedotransfer functions for the soil water retention and soil resistance to penetration under groundcover management systems in citrus. *Cienc Rural* 37(5):1316–1322. <https://doi.org/10.1590/S0103 84782007000500015>
- Gee GW and Bauder JW (1986) Particle-size Analysis. In: KLUTE CA, editor. *Methods soil Anal*. 2nd ed. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison pp 383–411.
- Gonçalves AO, Bastos TX, Barros AH, Ramalho Filho A, da Motta PEF (2010). In.: Methodological procedure for the Climatic Aptitude Assessment for the cultivation of oil palm in the deforested areas of the Legal Amazon. Ramalho Filho A. *Agroecological zoning, production and management of oil palm culture in the Amazon*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 216 p. ISBN 978-85-85864-34-7.
- Homma AKO, de Menezes AJEA, dos Santos JC, Gomes Júnior RA, da Silva RP, Monteiro, KFG, Sena AL dos S. Commercial Producers of Interspecific Hybrid Oil Palms (HIE – *Oleifera x Guineensis*) Integrated with Denpasa, in Northeast Pará. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2016. 38 p. ISSN 1676-5264.
- Horn R, Way T, Rostek J (2003) Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil & Tillage Research* 73: 101–106. doi:10.1016/S0167-1987(03)00103-X
- Hu W, Cichota R, Beare M, Müller K, Drewry J, Eger A (2023) Soil structural vulnerability: Critical review and conceptual development. *Geoderma* 430: 116346. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116346>
- Keong YK, Keng WM (2012) Statistical Modeling of Weather-based Yield Forecasting for Young Mature Oil Palm. *APCBEE Procedia* 4:58–65. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2012.11.011>
- Klute A (1986) Water retention: laboratory methods. In: *Methods soil Anal part 1 - : Physical and mineralogical methods*. American Society of Agronomy, Madison pp 635–662.

- Lipiec J, Czyż EA, Dexter AR, Siczek A (2018) Effects of soil deformation on clay dispersion in loess soil. *Soil Tillage Res* 184:203–206. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.005>
- Longepierre M, Widmer F, Keller T, Weisskopf P, Colombi T, Six J, Hartmann M (2021) Limited resilience of the soil microbiome to mechanical compaction within four growing seasons of agricultural management. *ISME Communications* 1:44. <https://doi.org/10.1038/s43705-021-00046-8>
- Machado JL, Tormena CA, Fidalski J, Scapim CA (2008) Inter-relationships between physical properties and the coefficients of soil water retention curve in an oxisol under different soil use. *R Bras Ci Solo* 32(2):495-502. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200004>
- Michelon CJ, Carlesso R, Oliveira ZB de, Knies AE, Petry MT, Martins JD (2010) Pedotransfer functions to estimate the water retention in some soils of Rio Grande do Sul state, Brazil. *Cienc Rural* 40(4):848–853. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000055>
- Milanez AY, Maia GB da S, Guimarães DD, Ferreira CLA (2022) Biodiesel and renewable diesel in Brazil: recent overview and perspectives. *BNDES* 28(56):41-71. Available via DIALOG. https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22585/1/PRArt215696_Biodiesel%20e%20diesel%20verde%20no%20Brasil.pdf Accessed 27 jan 2023
- Müller M, Munné-Bosch S (2011) Rapid and sensitive hormonal profiling of complex plant samples by liquid chromatography coupled to electrospray ionization tandem mass spectrometry. *Plant Methods* 7(1):37. doi:10.1186/1746-4811-7-37
- Mualem Y (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour Res* 12:513–522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>

- Munkholm LJ (2011) Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil Properties and management. *Geoderma* 167-168: 236–246. doi:10.1016/j.geoderma.2011.08.005
- Murphy BW (2015) Impact of soil organic matter on soil properties - a review with emphasis on Australian soils. *Soil Res* 53(6):605. doi:10.1071/sr14246
- Nelson DW and Sommers LE (1982) Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Madison SSS of A, editor. *Methods soil Anal Chem Microbiol Prop.* pp 539–579.
- NOAA (2023) National Oceanic and Atmospheric Administration. What to watch for: El Niño likely to develop this summer. Available via DIALOG. <https://www.noaa.gov/news/what-to-watch-for-el-nino-likely-to-develop-summer> Accessed 24 Apr. 2023.
- Noirot LM, Müller-Stöver DS, Wahyuningsih R, Sørensen H, Sudarno, Simamora A, Pujianto, Suhardi, Caliman J-P (2022) Impacts of empty fruit bunch applications on soil organic carbon in an industrial oil palm plantation. *J Environ Manage* 317(1):115373. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115373>
- Obour PB, Lamandé M, Edwards G, Sørensen CG, Munkholm LJ (2017) Predicting soil workability and fragmentation in tillage: a review. *Soil Use Manag* 33(2):288–298. <https://doi.org/10.1111/sum.12340>
- Obour, P. B., Jensen, J. L., Lamandé, M., Watts, C. W., & Munkholm, L. J. (2018). Soil organic matter widens the range of water contents for tillage. *Soil Tillage Res* 182:57–65. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.05.001>
- Obour PB, Keller T, Jensen JL, Edwards G, Lamandé M, Watts CW, Sørensen CG, Munkholm LJ (2019a). Soil water contents for tillage: A comparison of approaches and consequences for the number of workable days. *Soil Tillage Res* 195. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104384>

- Obour PB, Keller T, Lamandé M, Munkholma LJ (2019b) Pore structure characteristics and soil workability along a clay gradient. *Geoderma* 337:1186–1195. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.032>
- Peralta F, Vásquez O, Richardson DL, Alvarado A, Bornemisza E (1985) Agroecological zoning of oil palm cultivation. *Oléagineux* 40:8–9.
- R Core Team (2022) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Ramalho Filho A, Motta PEF da, Freitas PL de, Teixeira WG (2010) Agroecological zoning, production and management of oil palm culture in the Amazon. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 216 p. ISBN 978-85-85864-34-7
- Ramos HMN, Vasconcelos SS, Kato OR, Castellani DC (2018) Above- and belowground carbon stocks of two organic, agroforestry-based oil palm production systems in eastern Amazonia. *Agrofor Syst* 92:221–237. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0131-4>
- Ramírez PB, Fuentes-Alburquenque S, Díez B, Vargas I, Bonilla CA (2022) Soil microbial community responses to labile organic carbon fractions in relation to soil type and land use along a climate gradient. *Soil Biol Biochem* 141:107692. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107692>
- Santos HG dos (2018) Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5 Brasília: EMBRAPA, 2018, 356 p. ISBN 978-85-7035-817-2
- Sato MK, de Lima HV, Ferreira RL da C, Rodrigues S, da Silva ÁP (2017) Least limiting water range for oil palm production in Amazon region, Brazil. *Sci Agric* 74:148–156. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2015-0408>
- Scanlon BR et al (2002) Water potential: Miscellaneous methods for measuring matric or water potential. In: Dane JH, Topp C, editor. *Methods soil Anal Part 4 Physical methods*. pp 643–670.

- Schjønning P, de Jonge LW, Munkholm LJ, Moldrup P, Christensen BT, Olesen JE (2012) Clay Dispersibility and Soil Friability-Testing the Soil Clay-to-Carbon Saturation Concept. VZJ 11:. <https://doi.org/10.2136/vzj2011.0067>
- Sedap (2021) Secretariat for Agricultural Development and Fisheries. Municipal Agricultural Production – 2021: Panel - Federal Units of Brazil. Available via DIALOG. https://lookerstudio.google.com/u/0/reporting/2315899e-632b-4396-b631-8314f6b21830/page/p_6diq4m2a0c?s=nOGgfbuYGqo Accessed 27 jan 2023
- Silva VR, Reinert DJ, Reichert JM (2000) Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. Ciência Rural 30(7): 795-801.
- Shah AN, Tanveer M, Shahzad B, Yang G, Fahad S, Ali S, Bukhari MA, Tung SA, Hafeez A, Souliyanonh B (2017) Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. Environ Sci Pollut Res 24:10056–10067. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8421-y>
- Spoor G, Tijink FGJ, Weiskopf P (2003) Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. Soil & Tillage Research 73: 175–182. doi:10.1016/S0167-1987(03)00109-0
- Suzuki LEAS, Reinert DJ, Reichert JM, de Lima CLR (2008) Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. R. Bras. Ci. Solo 32:963-973.
- Tao HH, Snaddon JL, Slade EM, Henneron L, Caliman JP, Willis KJ (2018) Application of oil palm empty fruit bunch effects on soil biota and functions: A case study in Sumatra, Indonesia. Agric Ecosyst Environ 256:105–113. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.012>
- Utomo WH, Dexter AR (1981) Soil friability. J Soil Sci 32:203–213. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1981.tb01700.x>

- van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc Am J* 44:892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- van Lier Q de J (2010) *Soil Physics*. Brazilian Society of Soil Sciences, Viçosa, Minas Gerais 298 p. ISBN 978-85-86504-06-8
- Viégas I, Padilha W, da Leite R, et al (2022) Phosphate, potassium and magnesium fertilization on oil palm productivity: 12 years of monitoring in the Brazilian Amazon. *J Plant Nutr* 45(14):1–13.
- Walkley A and Black IA (1934) An examination of the degtyareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the cromatic acid titration method. *Soil Sci Soc Am Journal* 37(1):29–38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Watts CW and Dexter AR (1998) Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *Eur J Soil Sci* 49(1): 73–84. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1998.00129.x>
- Yu Q, Wang M, Tian Y, Shi X, Li X, Xu L, Zhu Y (2021) Effects of porous clay ceramic rates on aeration porosity characteristics in a structurally degraded soil under greenhouse vegetable production. *Pedosphere* 31(4):606–614. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60006-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60006-1)
- Zuraidah Y (2019) Influence of soil compaction on oil palm yield. *J Oil Palm Res* 31:67–72. <https://doi.org/10.21894/jopr.2018.0064>

CAPÍTULO 2 - VARIAÇÃO TEMPORAL DE PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO LIMITANTES AO CRESCIMENTO RADICULAR EM PLANTIOS DE PALMA DE ÓLEO NA AMAZONIA ORIENTAL

RESUMO

Em cultivos de palma de óleo, a compactação do solo causa preocupação, pois impacta na resistência a penetração de raízes (RP) e porosidade de aeração do solo (PA), variáveis limitantes ao crescimento radicular. Por isso, a hipótese deste estudo foi que dependendo da época do ano o crescimento radicular da palma de óleo pode ser limitado pela RP ou PA. Os objetivos foram: (i) avaliar o efeito dos replantios, zonas de manejo e variação temporal na RP e PA e identificar quais propriedades do solo influenciam na massa seca de raízes de palma de óleo; (ii) selecionar uma equação, que sirva para o diagnóstico e monitoramento da compactação em solo com palma de óleo. A amostragem foi realizada em três áreas com idades distintas de replantio nas zonas de manejo: coroamento (P) e tráfego de máquinas (LL) e nas profundidades 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Avaliou-se a variação temporal da RP, PA durante doze meses, e a relação entre a massa seca de raízes e as propriedades do solo. A idade dos replantios influenciou mais a RP, diferente da PA que foi influenciada pelos fatores idade e zonas. Valores críticos de RP ocorreram apenas no trimestre mais seco e na profundidade 0,20-0,40 m. A alta umidade do solo impactou os menores valores de RP, sendo mais bem ajustada por regressão não linear. Nos trimestres mais chuvosos, os solos estiveram com PA abaixo do limite crítico ao desenvolvimento das plantas (10%), principalmente em subsuperfície. A massa seca de raízes foi negativamente influenciada pela RP em solo mais seco, evidenciado a importância do monitoramento destas variáveis para o diagnóstico de compactação e desenvolvimento da palma de óleo.

Palavras-chave: Aeração do solo, crescimento radicular, compactação do solo, resistência a penetração

TEMPORAL VARIATION OF SOIL PHYSICAL PROPERTIES LIMITING ROOT GROWTH IN OIL PALM PLANTATIONS IN THE EASTERN AMAZON

ABSTRACT

In oil palm cultivation, soil compaction is a cause for concern as it impacts on root penetration resistance (PR) and soil aeration porosity (AP), which are limiting variables for root growth. Therefore, the hypothesis of this study was that depending on the time of year, oil palm root growth may be limited by PR or AP. The objectives were: (i) to evaluate the effect of replanting, management zones and temporal variation on RP and PA and to identify which soil properties influence the dry mass of oil palm roots; (ii) to select an equation that can be used to diagnose and monitor compaction in oil palm soil. Sampling was carried out in three areas with different replanting ages in the management zones: crowning (P) and machine traffic (LL) and at depths of 0-0.20, 0.20-0.40 and 0.40-0.60 m. The temporal variation in RP, AP over twelve months and the relationship between root dry mass and soil properties were evaluated. The age of the replanting had a greater influence on PR, unlike AP, which was influenced by the factors age and zones. Critical RP values only occurred in the driest trimester and at a depth of 0.20-0.40 m. High soil humidity had an impact on the lower PR values, which were better adjusted by non-linear regression. In the rainiest trimesters, the soils had AP below the critical limit for plant development (10%), especially in the subsurface. Root dry mass was negatively influenced by RP in drier soil, highlighting the importance of monitoring these variables for the diagnosis of compaction and oil palm development.

Keywords: Penetration resistance, Soil compaction, soil aeration, root growth.

1 Introdução

A palma de óleo (*Elaeis guineenses* Jacq.) é um vegetal importante para a indústria alimentícia e energética na Amazônia, que comporta a maior produção nacional no Estado do Pará (98,56%), cerca de 2.846.023 toneladas em 2021 (Sedap, 2023). O híbrido *Elaeis guineenses* Jacq. x *Elaeis Oleifera* (H.B.K.) Cortés é amplamente cultivado no Estado. A cultura apresenta ciclo produtivo de até 25 anos e durante este período para a gestão dos plantios são necessárias diversas operações mecanizadas, como aração, gradagem no preparo do solo e depois roçagens, adubações, pulverizações e cambitagem (Ramalho Filho et al., 2010). No

entanto, o uso sucessivo de máquinas pesadas provoca compactação no solo, especialmente em condições de solo úmido (Hamza e Anderson 2005; Zuraidah et al., 2011).

O manejo com máquinas na agricultura é um dos responsáveis pela compactação do solo de origem antropogênica, um problema que afeta a produtividade dos solos em diversas regiões do mundo, onde cerca de 68 milhões de hectares foram degradados por compactação. Na América Latina as principais causas da compactação estão relacionadas ao pisoteio do rebanho e agricultura mecanizada (FAO, 2015). O efeito da compactação na produção das culturas é de difícil avaliação em regiões tropicais (Lal, 2003). A compactação impacta negativamente a produtividade das culturas (Batey, 2009; Hamza e Anderson, 2005), sendo tema preocupante entre os produtores de palma de óleo. Os problemas desencadeados pela compactação do solo foram intensificados ao longo do século passado, por conta do advento da agricultura mecanizada e crescimento contínuo no tamanho médio dos tratores (Upadhyaya, 1982). Depois que o solo é compactado é preciso diversas práticas sustentáveis para o restabelecimento da saúde do solo (Colombi e Keller, 2019), por isso, ao avaliar o impacto da compactação no crescimento da cultura é importante observar interações entre as propriedades físicas do solo e condições climáticas, para traçar estratégias de manejo que atenuem os efeitos no solo e nas plantas.

A compactação do solo é caracterizada pelo aumento da densidade e diminuição marcante da macroporosidade, culminando em maior resistência do solo a penetração de raízes (Horn et al., 2013; Batey, 2009; Damme et al., 2021). A resistência mecânica do solo pode desencadear a diminuição do alongamento das raízes, que tendem a crescer horizontalmente, e assim, a extensão de solo em profundidade explorada pelas raízes fica limitada (Zuraidah et al., 2010). Em condições compactadas as funções do solo de transporte de água e gases são reduzidas, devido os efeitos negativos que impactam a continuidade dos poros (Horn e Smucker, 2005; Kuncoro et al., 2014), levando a ineficiente drenagem e baixa aeração do solo (Gysi et al., 1999; Reiser et al., 2020), dificultando a absorção de água e nutrientes pelas plantas (Beutler et al., 2007; Colombi et al., 2019).

Como a resistência a penetração apresenta relação direta com o crescimento radicular, valores críticos foram atribuídos a essa variável dependendo do sistema de cultivo e espécie, e em geral varia entre 1,5 e 3,5 MPa (Bengough et al., 2011; Moraes et al., 2014). Sato et al. (2017) estudando o intervalo hídrico ótimo na Amazônia consideraram que a resistência a penetração acima de 2,5 MPa restringiu o desenvolvimento da palma de óleo associado ao menor conteúdo de água no solo.

As condições climáticas, principalmente a pluviosidade influenciam nos efeitos da compactação do solo (Batey, 2009). Em regiões tropicais com pluviosidade média acima de 2.000 mm, é interessante investigar os efeitos da resistência a penetração e porosidade de aeração no desenvolvimento das culturas, porque tanto a alta resistência a penetração em condição de solo seco, quanto a baixa aeração do solo em condição de alta umidade, podem limitar o alongamento radicular, culminando em sistemas radiculares superficiais (Colombi et al., 2019; Dresbøll et al., 2013). Os valores limitantes de porosidade de aeração ficam abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (10%), ocasião em que as trocas gasosas no solo são ineficientes, resultando em baixa atividade dos organismos aeróbicos do solo (Longepierri et al., 2021; Castioni et al., 2021; Santos et al., 2021). Acredita-se que a palma de óleo é resistente a condições úmidas devido sua origem em ambientes alagados (Corley e Tynker, 2015). O comportamento dessa cultura em resposta a porosidade de aeração é pouco entendido, mas em virtude das mudanças climáticas e condições extremas de umidade no solo, os riscos de elevada resistência a penetração e baixa aeração provavelmente aumentarão no futuro, culminando em provável redução da produtividade da palma de óleo.

A resistência a penetração é uma variável utilizada como indicador de compactação (Oliveira et al., 2022), que é altamente influenciada pela densidade do solo e a umidade (Safadoust et al., 2014; Liu et al., 2022), bem como tem influência direta em variáveis biológicas como a densidade e comprimento radicular (Strock et al., 2022). A variação temporal da resistência a penetração e porosidade de aeração podem ser usadas para diagnósticos de compactação (Liu et al., 2022). Para tanto, é necessário ajustar a resistência a penetração utilizando uma equação representativa para as condições de solos tropicais, onde o efeito da umidade na resistência a penetração é a principal problemática no contexto de plantios de palma.

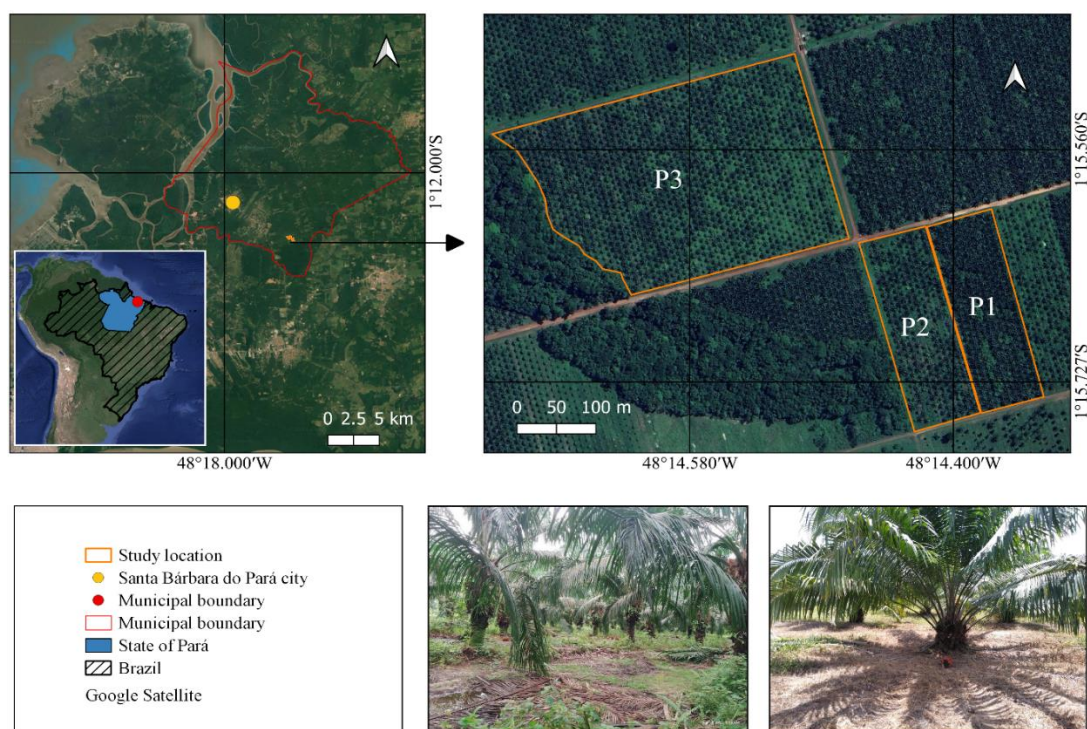
Assim, a hipótese deste estudo é que dependendo da época do ano o crescimento radicular da palma de óleo pode ser limitado pela resistência a penetração ou porosidade de aeração em solo com cultivo convencional. O primeiro objetivo foi avaliar o efeito dos replantios, zonas de manejo e variação temporal na resistência a penetração e porosidade de aeração e identificar quais propriedades do solo influenciam na massa seca de raízes de palma de óleo. O segundo foi selecionar uma equação representativa, que sirva para o diagnóstico e monitoramento da compactação em solo com palma de óleo, com base em cinco equações de ajuste da resistência a penetração considerando a umidade (θ) e a densidade (ρ_b), propostas por Mielke et al. (1994), Busscher et al. (1997, 1990) e Jakobsen e Dexter (1987).

2 Material e métodos

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em áreas com híbrido da palma de óleo no município de Santa Bárbara, região Metropolitana de Belém, Pará, Brasil, $1^{\circ} 13' 27''$ S e $48^{\circ} 17' 38''$ O (Figura 1), sob clima equatorial úmido Afi, segundo Koppen.

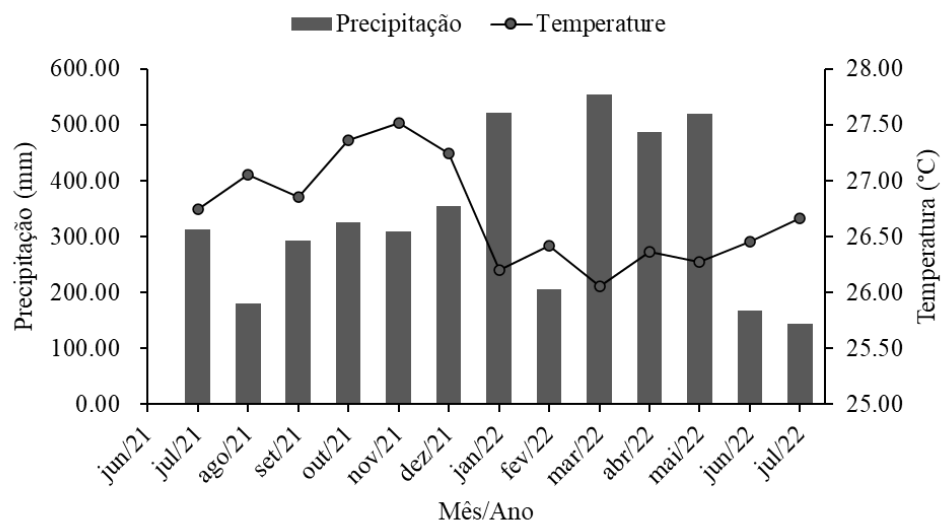
Figura 1 – Mapa de localização de plantios de palma de óleo em Santa Bárbara do Pará, Amazônia Oriental



Onde, P1, P2, e P3 correspondem a áreas replantadas em 1999, 2013 e 2017, respectivamente

A precipitação total de julho de 2021 a junho de 2022 foi 4232,90 mm, sendo um total de 167,80 mm no mês mais seco (junho de 2022) e 554,20 mm no mês mais chuvoso (março de 2022), apresentando temperaturas média anual $26,7^{\circ}$ C (Figura 2). O solo foi classificado como Latossolo Amarelo distrófico com caráter plântico (Santos et al., 2018).

Figura 2 – Precipitação e temperatura mensal durante julho de 2021 e junho de 2022 em plantios de palma de óleo no município de Santa Bárbara do Pará, Amazônia Oriental



O conteúdo de carbono orgânico (Nelson e Sommers, 1982), a distribuição do tamanho de partículas (Gee e Bauder, 1986) e a densidade do solo (Blake e Hartage, 1986a) até 0,60 m de profundidade estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Médias do carbono orgânico do solo (SOC), distribuição granulométrica e densidade (ρ_b) do Latossolo Amarelo cultivados com híbridos de palma de óleo em Santa Bárbara, Estado do Pará, Brasil. Média \pm Desvio padrão.

| Propriedades | SOC | Argila | Silte | Areia | Classe textural | ρ_b |
|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| g kg ⁻¹ | | | | | | g cm ⁻³ |
| Prof (m) | P1 | | | | | |
| 0-0,20 | 13,73 \pm 4,65 | 121,61 \pm 10,64 | 48,82 \pm 11,93 | 829,57 \pm 20,58 | Areia franca | 1,44 \pm 0,19 |
| 0,20-0,40 | 6,94 \pm 4,44 | 132,24 \pm 6,45 | 80,23 \pm 21,08 | 787,54 \pm 14,82 | Franco arenoso | 1,57 \pm 0,16 |
| 0,40-0,60 | 3,99 \pm 2,70 | 150,25 \pm 28,72 | 90,15 \pm 24,19 | 759,60 \pm 4,54 | Franco arenoso | 1,55 \pm 0,16 |
| | P2 | | | | | |
| 0-0,20 | 8,67 \pm 2,66 | 109,28 \pm 10,63 | 29,62 \pm 11,46 | 861,09 \pm 14,44 | Areia franca | 1,49 \pm 0,09 |
| 0,20-0,40 | 4,52 \pm 2,02 | 160,97 \pm 10,80 | 25,71 \pm 9,79 | 813,32 \pm 2,57 | Franco arenoso | 1,59 \pm 0,11 |
| 0,40-0,60 | 3,60 \pm 1,96 | 157,24 \pm 11,26 | 55,29 \pm 22,90 | 787,47 \pm 11,67 | Franco arenoso | 1,63 \pm 0,11 |
| | P3 | | | | | |
| 0-0,20 | 13,47 \pm 11,41 | 119,18 \pm 16,03 | 71,05 \pm 2,58 | 809,77 \pm 13,48 | Franco arenoso | 1,51 \pm 0,17 |
| 0,20-0,40 | 7,21 \pm 2,48 | 157,01 \pm 12,27 | 92,30 \pm 26,38 | 750,69 \pm 25,83 | Franco arenoso | 1,55 \pm 0,13 |
| 0,40-0,60 | 6,67 \pm 2,25 | 164,12 \pm 14,39 | 56,15 \pm 13,59 | 779,74 \pm 14,04 | Franco arenoso | 1,58 \pm 0,29 |

As áreas de estudo começaram a ser cultivadas com palma de óleo na década de 1960, antes era floresta nativa. Para o início do plantio foram realizados corte, queima, aração e gradagem em profundidade de 0,20 m. Após o plantio da palma, foi implantada a pueraria (*Pueraria phaseoloides*) como planta de cobertura até 1985. De 1987 a 1990 os plantios caíram

em decadência, devido ao amarelecimento fatal, anomalia que acomete principalmente o híbrido tenera. As áreas foram renovadas com tenera em 1999, porém seis anos depois o amarelecimento fatal acometeu as plantas novamente. Em virtude de avanços em genética, iniciou alguns plantios como híbrido interespecífico, que é menos suscetível ao amarelecimento fatal, ainda em 1999. Em 2013 e 2017 também foram renovados plantios, mas sem aração e gradagem, houve apenas limpeza, e formação de leiras com trator de esteira. Em todas as renovações de plantio as linhas de plantio foram mantidas na posição, apenas as plantas mudaram na mesma linha. Neste estudo utilizou-se para as áreas com replantios de 1999, 2013 e 2017, a definição pelas siglas P1, P2 e P3, respectivamente.

As operações de tráfego agrícola frequentes nas áreas foram: adubação três vezes ao ano; aplicação de calcário uma vez; controle de plantas invasoras, com a roçadeira (três vezes ao ano); e coroamento químico seis vezes ao ano. Em agosto de 2022 foi realizada adubação orgânica com 20 ton ha⁻¹ de engaço (EFB) em todas as áreas. A cambitagem mecanizada ocorre a cada 21 dias, e consiste na retirada dos cachos colhidos das áreas de produção. Todas as atividades são realizadas com tratores de pneu (marcas Valtra ou Ford), com pressões 14 lb nos pneus dianteiros e 16 lb nos traseiros.

2.2 Amostragem

A amostragem iniciou em julho de 2021 e findou em junho de 2022 determinando-se a resistência a penetração e a umidade do solo. No primeiro mês foram coletadas amostras indeformadas em anéis (0,05 x 0,05 m) nas profundidades 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, para determinação da densidade do solo, porosidade total e umidade. A profundidade máxima considerada foi estabelecida com base no crescimento radicular da palma de óleo (Carr, 2011; Intara et al., 2018). Amostras deformadas também foram coletadas para obtenção do carbono orgânico do solo, textura e densidade de partículas. A resistência a penetração foi obtida simultaneamente com o penetrômetro eletrônico de campo.

A amostragem foi realizada em duas zonas de manejo: coroamento (P), distante 2,4 m da planta avaliada, conforme Peralta et al. (1985) e zona de tráfego de máquinas (LL), próximo de doze plantas de cada área. Em todas as zonas foram coletadas amostras nas três profundidades.

Durante o monitoramento, em cada área, foram coletadas porções de solo para obtenção da umidade gravimétrica (10 g). Este solo foi colocado em sacos e acomodados em caixas

térmicas para o transporte ao laboratório, onde o peso úmido foi quantificado no mesmo dia das coletas, e as amostras foram levadas a estufa em 105 °C para obtenção do peso seco. Ao lado da coleta de solo foram realizadas leituras da resistência a penetração no campo. A média de resistência a penetração por zona de manejo foi obtida a partir de três leituras em cada zona e profundidade, totalizando 216 leituras por área.

A resistência a penetração foi obtida com um penetrômetro PenetroLOG, modelo PLG1020 (Falker Automação Agrícola), que mede até 0,60 m de profundidade, resolução de 0,01 m. O equipamento conta com uma haste e um cone de diâmetro de 0,0128 m e ângulo de penetração de 30° (Falker, 2009). O penetrômetro de campo opera através de medições eletrônicas da força de resistência mecânica a compactação do solo, o que corresponde ao índice de cone.

2.3 Análises de solo

A distribuição do tamanho de partículas foi determinada pelo método da pipeta com uso do NaOH 1M como dispersante químico e agitação por 16 h (Gee e Bauder, 1986). As frações areia foram considerada como sendo o material retido na peneira de 0,053 mm, a argila utilizando uma alíquota de 25 ml e o silte determinado por diferença. A fração areia foi separada em areia fina (< 0,25 mm), média (0,50-0,25 mm) e grossa (2,00-1,00 mm). O carbono orgânico do solo (SOC) foi determinado pelo método Walkley Black modificado (Nelson e Sommers, 1982), utilizando o princípio da oxidação da matéria orgânica com dicromato de potássio em meio sulfúrico.

A porosidade total (TP) foi calculada a partir da densidade do solo (ρ_b) e da densidade de partícula (ρ_s) de acordo com a formula $PT = 1 - \rho_b/\rho_s$ (Embrapa, 2017). A ρ_b foi obtida a partir de amostras indeformadas de 0,05 m de diâmetro e altura, posterior secagem em estufa a 105 °C até atingir massa constante (Blake e Hartage, 1986a). A ρ_s foi determinada pelo método do picnômetro (Blake e Hartage, 1986b).

A umidade do solo foi obtida através da massa da água presente em 10 g de solo, calculada através da equação 1:

$$\theta = \left(\frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \right) \times \rho_b \quad (1)$$

onde, θ umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$), M_{su} e M_{ss} é a massa de solo úmida e massa de solo seca (g), respectivamente, ρ_b é a densidade do solo ($g cm^{-3}$).

A variação temporal da porosidade do solo ocupada pelo ar (PA) foi calculada usando a porosidade total e o conteúdo volumétrico de água do solo, equação 3:

$$PA = (PT - \theta) * 100 \quad (3)$$

onde, PA é a porosidade de aeração (%), PT porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), θ umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).

2.4 Seleção da equação de ajuste da resistência a penetração

Para a obtenção dessa equação, primeiro foi realizado a estatística descritiva da resistência a penetração (mínimo, máxima, média, desvio padrão e coeficiente de variação) em cada zona, profundidade e área, para cada mês monitorado.

Os doze meses monitorados correspondem a 100% do banco de dados, separados em médias trimestrais de umidade do solo e resistência a penetração para o ajuste das equações (subconjuntos com 25% dos dados). Essa etapa foi aplicada aos dados de cada profundidade e zona separadamente. O trimestre 1 (TRI1) correspondeu aos meses de julho, agosto e setembro de 2021; o trimestre 2 (TRI2) aos meses de outubro, novembro e dezembro de 2021; o trimestre 3 (TRI3) aos meses de janeiro, fevereiro e março de 2022; e o trimestre 4 (TRI4) correspondeu aos meses de abril, maio e junho de 2022.

Nos subconjuntos, a resistência a penetração foi ajustada com base em equações que predizem a resistência a penetração em função da θ e ρ_b . As equações 3 e 4 foram propostas por Mielke et al. (1994), 5 e 6 de acordo com Busscher et al. (1997) e (1990), respectivamente, e a equação 7 por Jakobsen e Dexter (1987).

$$RP = a \times \theta^b \quad (3)$$

$$RP = a \times (1 - \theta)^b \quad (4)$$

$$RP = a \times \exp(-b \times \theta) \quad (5)$$

$$RP = c \times \theta^d \times \rho_b^e \quad (6)$$

$$RP = \exp(a + b \times \rho_b + c \times \theta) \quad (7)$$

onde, RP é a resistência a penetração de raiz (MPa); θ é a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); ρ_b é a densidade do solo (g cm^{-3}); e a, b, c, d, e são os parâmetros das equações de ajuste.

Os ajustes foram realizados pelo pacote “Solver” no Excel. A precisão dos modelos foi observada através do critério de informação de Akaike (AIC), onde valores AIC mais negativos indicam melhor desempenho do modelo (Akaike, 1973; Minasny et al., 1999). Para tanto, o subconjunto foi escolhido aleatoriamente para a avaliação da precisão dos modelos, utilizando o modelo AIC. A avaliação do desempenho dos modelos foi feita por indicadores estatísticos, através da relação entre valores estimados e valores medidos.

Os indicadores estatísticos utilizados foram: coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro médio (EM) e erro quadrado médio (RMSE), conforme as equações 8, 9, 10 e 11:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (RP_{pred} - \overline{RP_{pred}})(RP_{med} - \overline{RP_{med}})]^2}{\sum_{i=1}^n (RP_{pred} - \overline{RP_{pred}})^2 \sum_{i=1}^n (RP_{med} - \overline{RP_{med}})^2} \quad (8)$$

$$RP^2_{aj} = 1 - [(1 - R^2)x \frac{n-1}{n-p}] \quad (9)$$

$$EM = \sum_{i=1}^n \frac{(RP_{med} - RP_{pred})^2}{n} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (RP_{med} - RP_{pred})^2}{n}} \quad (11)$$

onde, RP_{med} é a resistência a penetração de raiz (MPa) medida e RP_{pred} é a resistência a penetração de raiz (MPa) prevista, RP_{pred} e RP_{med} são a média da RP prevista e medida, respectivamente para n total de observações.

2.5 Variável biológica

A massa seca de raízes foi quantificada com base na massa das raízes presentes em aproximadamente 98,18 cm³ de volume de solo coletado em julho de 2021. Foram coletados 12 volumes na zona de coroamento (1178,16 cm³) em cada profundidade, totalizando 36 por área. No laboratório o solo foi destorroado e as raízes maiores retiradas com a pinça. As raízes menores que 2 mm, consideradas muito finas, foram separadas usando a peneira 0,053 mm. Posteriormente as raízes foram secas em estufa a 60 °C até atingir peso constante (Böhm, 1979). A biomassa de raízes do volume amostrado foi extrapolada para um hectare (Mg ha⁻¹).

2.6 Análise estatística

Análise de variância foi executada a fim de testar os efeitos dos replantios e zonas de manejo na resistência a penetração e porosidade de aeração do solo (separadamente por profundidade). A normalidade dos dados foi observada através do teste Shapiro-Wilk a 5%. Os dados não normais foram normalizados através da função log. As médias foram comparados pelo teste Tukey a 5%. A resistência a penetração, mensurada em julho/2021 foi submetida a análise de regressão com o objetivo de avaliar seu comportamento nas diferentes profundidades estudadas. A regressão foi realizada no software R Core Team (2022). A relação entre as propriedades do solo (areia, silte, argila, ρ_b , RP, PA, observadas em julho/2021) e massa seca de raízes foi demonstrado utilizando análise multivariada de componentes principais (PCA).

3 Resultados

3.1 Efeito dos replantios e zonas de manejo resistência a penetração e porosidade de aeração

O tempo de replantios e as zonas de manejo influenciaram a resistência a penetração de raízes (RP) e porosidade de aeração (PA) em diferentes trimestres do ano ($P \leq 0,05$). Em geral, as áreas P1 e P3 apresentaram as maiores médias de RP nas três profundidades, independente das zonas de manejo (Tabela 2). Na profundidade 0-0,20 m a área P3 apresentou maior RP na zona coroamento, no primeiro trimestre (TRI1).

Tabela 2 – Médias da resistência a penetração de raiz e porosidade de aeração em função do tempo de replantio e zonas de manejo em solo cultivado com palma de óleo em Santa Bárbara, Amazônia Oriental.

| Serra Barbada, Amazônia Oriental | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-------------|---------|-------------|----------|-------------|----------|
| Áreas | Zonas | Trimestre 1 ^a | | Trimestre 2 | | Trimestre 3 | | Trimestre 4 | |
| | | RP ^b | PA ^c | RP | PA | RP | PA | RP | PA |
| 0-0,20 m | | | | | | | | | |
| P1 ^d | P ^g | 0,82Aa | 10,44Bb | 0,79Aa | 5,72Bb | 0,78Aa | 5,91Bb | 0,53Aa | 5,35Bb |
| | LL ^h | 0,89Aa | 20,91Aa | 0,92Aa | 13,80Ba | 0,77Aa | 13,01ABa | 0,54Aa | 11,89Aa |
| P2 ^e | P | 0,56Ba | 19,69Bb | 0,74Aa | 17,89Aa | 0,63Ba | 12,86Aa | 0,55Aa | 10,77Aa |
| | LL | 0,72Ba | 18,06ABb | 0,67Aa | 17,82Aa | 0,55Ba | 15,02Aa | 0,46Aa | 13,51Aa |
| P3 ^f | P | 1,11Aa | 19,82Ba | 0,64Aa | 15,46Aa | 0,45Ba | 14,61Aa | 0,43Aa | 13,49Aa |
| | LL | 1,02Aa | 15,18Bb | 0,71Aa | 10,99Bb | 0,47Ba | 10,01Bb | 0,45Aa | 10,82Aa |
| 0,20-0,40 m | | | | | | | | | |
| P1 | P | 2,37Aa | 18,95Aa | 2,39Aa | 12,70Ba | 2,39Aa | 11,23Aa | 2,17Aa | 12,18Aa |
| | LL | 2,63Aa | 15,53Ab | 2,43Aa | 9,55Ba | 2,05Aa | 6,52Ab | 1,79Aa | 9,00Aa |
| P2 | P | 2,20Aa | 16,92Aa | 1,76Ba | 13,56Aa | 1,49Bb | 8,36Aa | 1,59Ba | 10,02ABa |
| | LL | 2,39Aa | 0,14Bb | 2,05Ba | 13,66Aa | 1,87ABa | 8,74Aa | 1,55Ba | 10,69ABa |
| P3 | P | 2,32Aa | 16,08Aa | 1,65Ba | 10,55Ba | 1,25Ba | 9,57Aa | 1,67Ba | 7,57Ba |
| | LL | 2,59Aa | 15,39Aa | 1,68Ba | 11,28Ba | 1,47Ba | 9,56Aa | 1,47Ba | 8,06Ba |
| 0,40-0,60 m | | | | | | | | | |
| P1 | P | 2,14ABa | 0,13Cb | 2,33Aa | 8,30Ba | 2,06Aa | 6,90Ba | 1,87Aa | 6,26Ba |
| | LL | 1,96 ABa | 9,61Ba | 2,32Aa | 3,31Cb | 1,89Aa | 3,81Cb | 1,72Aa | 3,80Ba |
| P2 | P | 1,73Ba | 21,12Aa | 1,63Bb | 19,21Aa | 1,38Ba | 9,54Ba | 1,51Aa | 11,87Ab |
| | LL | 1,96Ba | 21,87Aa | 2,02Ba | 17,89Aa | 1,52Ba | 14,74Aa | 1,61Aa | 15,06Aa |
| P3 | P | 2,33Aa | 15,55Ba | 1,90ABa | 9,90Ba | 1,43Ba | 13,12Aa | 1,85Aa | 7,22Ba |
| | LL | 2,32Aa | 11,79Bb | 1,58Aa | 7,94Ba | 1,41Ba | 8,27Ba | 1,29Aa | 5,75Ba |

^aTrimestres referente ao período de julho/2021 a junho/2022; ^bResistência a penetração de raiz (Mpa); ^cPorosidade de aeração (%); ^{d,e,f}Replantios de 1999, 2013 e 2017, respectivamente; ^gCoroamento; ^hLinha de tráfego de máquinas; Fator A = Plantios, representado por letras maiúsculas; Fator B = Zonas de manejo, representadas por letras minúsculas.

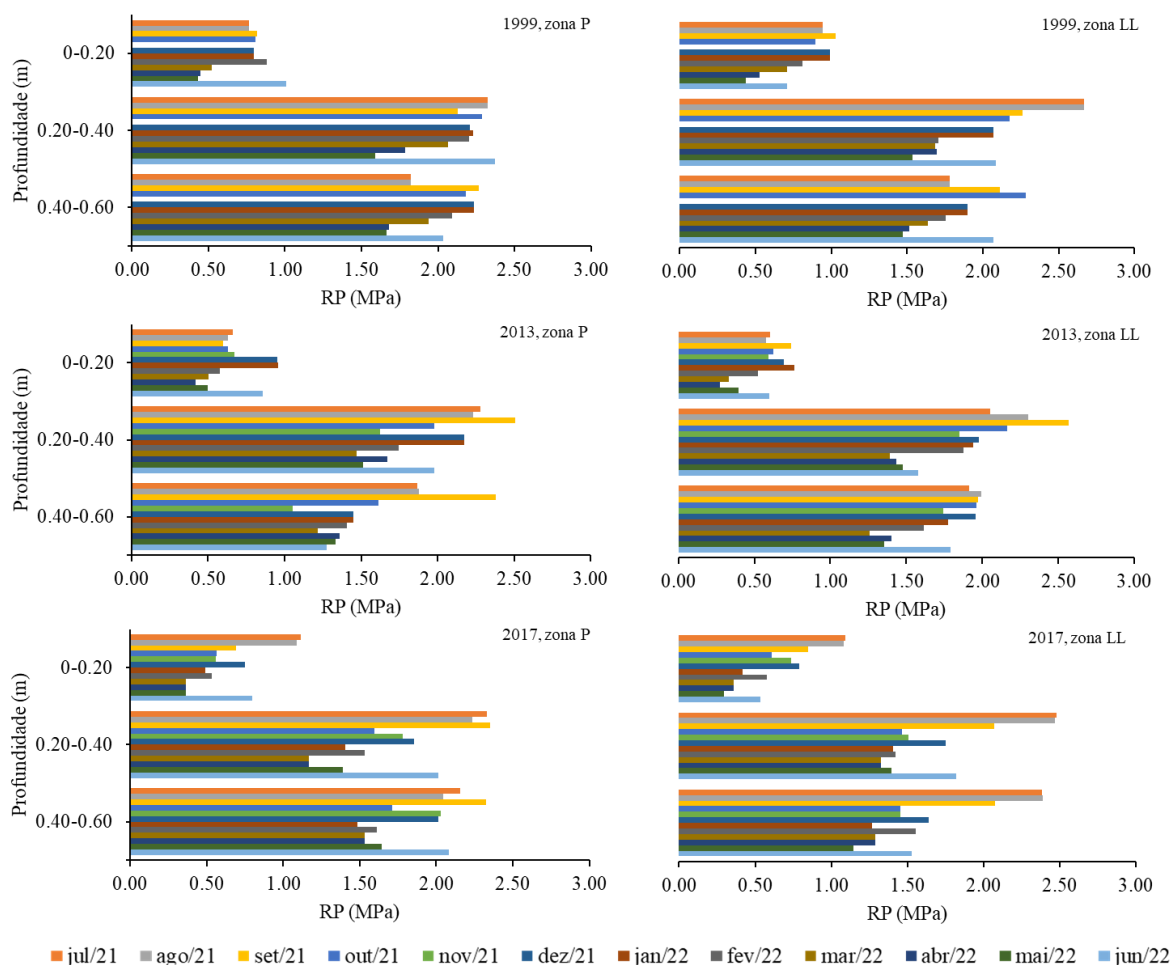
Na profundidade 0,20-0,40 m a RP diferiu entre as áreas nos TRI2, TRI3, e TRI4, onde na zona de tráfego de máquinas os valores superiores no TRI2 foram em P1, cerca de 15,64% e 30,86% comparado as áreas P2 e P3, respectivamente. No TRI3 a RP na zona de tráfego da área P1 foi 28,29% maior que P3, nesta zona de plantio. No TRI4 o maior valor de RP esteve na área P1, que foi superior 26,73% e 23,04% a RP em P2 e P3, respectivamente no coroamento. As áreas P1 e P3 apresentaram as maiores RP nos TRI1 e TRI2, profundidade 0,40-0,60 m.

As zonas de manejo influenciaram diferenças notáveis no TRI3 e TRI2, nas profundidades 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, respectivamente ($P \leq 0,05$). Nessas profundidades, a zona de tráfego da área P2 apresentou RP mais altas em comparação com o coroamento, com aumento de 20,32% no TRI3 em 0,20-0,40 m, e 19,31% no TRI2 em 0,40-0,60 m (Tabela 2).

As áreas replantadas mais recente (P2 e P3) apresentaram maiores valores de porosidade de aeração em comparação com a mais antiga (P1) na profundidade de 0-0,20 m nos TRI2, TRI3 e TRI4 (Tabela 2). As porcentagens mais altas de PA foram observadas no TRI1 em todas as profundidades. Na área P1, profundidade 0-0,20 m, a menor PA ocorreu no coroamento, pois, na zona de tráfego a PA foi superior em todos os trimestres cerca de 50,07%, 58,55%, 54,57% e 55,01% nos TRI1, TRI2, TRI3 e TRI4, respectivamente. No entanto, na profundidade de 0,20-0,40 m, área P1 apresentou um comportamento diferente nos trimestres TRI1 e TRI3, onde no coroamento foi superior 18,05% e 41,94% comparada à zona de tráfego, respectivamente. Na profundidade 0,40-0,60 m a zona de tráfego da área P1 foi 98,65% superior ao coroamento no TRI1, enquanto, ocorreu o contrário nos TRI2 e TRI3, onde o coroamento esteve com maior PA, cerca de 60,12% e 44,78%, respectivamente.

A profundidade superficial apresentou médias de resistência a penetração (RP) medida em campo abaixo de 1,5 MPa em todos os meses avaliados nas áreas com palma de óleo (Figura 3). Médias acima de 2,5 MPa foram comuns na zona de tráfego de máquinas, nos meses menos chuvosos (jul/21 e ago/2021) na área P1 e em set/21 na área P2. Os resultados apontam maiores impedimentos ao crescimento radicular nas profundidades subsuperficiais, tanto no coroamento, zona de maior influência radicular da palma, como na zona de tráfego indicando a compactação dos solos estudados.

Figura 3 – Médias mensais da resistência a penetração de raízes (RP) nas zonas de manejo coroamento (P) e linha de tráfego de máquinas (LL) em diferentes profundidades de solos cultivados com palma de óleo em Santa Bárbara, Amazônia Oriental



A resistência a penetração variou dentro das profundidades do solo em todas as áreas e zonas de manejo ($P \leq 0,001$), o modelo que mais se adequou para ajustar os dados foi o polinomial do segundo grau, com tendência a estabilizar a RP em profundidades subsuperficiais dos solos avaliados. Em geral, os maiores valores de RP ($\geq 2,13$ Mpa) medido e com base no modelo ajustado, estiveram entre as profundidades 0,42-0,47 m (Tabela 3).

Tabela 3 – Regressão polinomial e coeficientes de regressão para a relação entre a resistência a penetração e a profundidade do solo com híbrido de palma de óleo: $PR = -b_2Prof^2 + b_1Prof - b_0$.

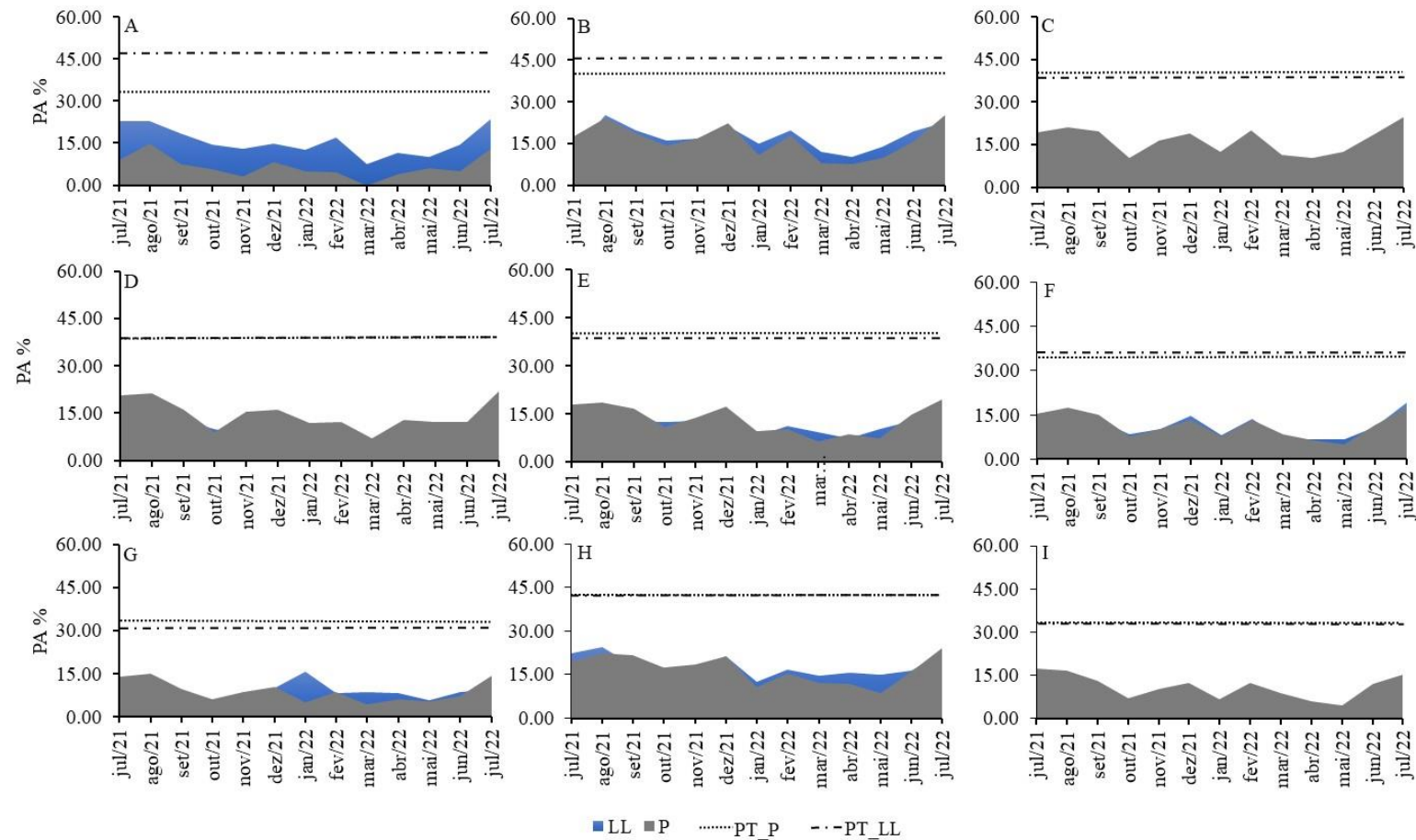
| Áreas | Zonas | Coeficientes | | | Anova | |
|-------|-------|---------------|--------------|---------------|-------|------|
| | | b_0 | b_1 | b_2 | R^2 | P |
| P1 | P | -2,19±0,29*** | 0,19±0,02*** | -0,00±0,00*** | 0,89 | 0,00 |
| | LL | -3,39±0,72*** | 0,28±0,04*** | -0,00±0,00*** | 0,62 | 0,00 |
| P2 | P | -2,29±0,36*** | 0,19±0,02*** | -0,00±0,00*** | 0,79 | 0,00 |
| | LL | -2,43±0,62*** | 0,19±0,04*** | -0,00±0,00*** | 0,65 | 0,00 |
| P3 | P | -1,45±0,32*** | 0,13±0,02*** | -0,00±0,00*** | 0,83 | 0,00 |
| | LL | -1,77±0,93* | 0,18±0,05** | -0,00±0,00** | 0,44 | 0,00 |

***, **, *, . Significativo a 0.1%, 1%, 5%, 10%, respectivamente. Onde, RP: Resistência a penetração (Mpa);

Prof: Profundidades do solo (m); b_0 , b_1 e b_2 são coeficientes de regressão.

A variação temporal da porosidade de aeração evidencia que, ao longo do período analisado, a umidade do solo ocupou a maior proporção do sistema poroso do solo (Figura 4), culminando em baixos percentuais de PA, principalmente nos meses de maior precipitação (Jan, mar, abril, maio).

Figura 4 – Distribuição temporal da porosidade de aeração, comparada a porosidade total (PT) do solo nas zonas de manejo, linha de tráfego (LL) e coroamento (P) de plantios com palma de óleo em Santa Bárbara, Pará, Amazônia Oriental



onde, as colunas correspondem as áreas com replantios P1, P2, P3, respectivamente. As linhas correspondem as profundidades 0-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60 m, respectivamente

Em todas as áreas foram observados valores de PA abaixo de 10%. Em P1 os menores valores de PA foram em mar/2022, momento em que 100% e 83,98% da porosidade total das zonas P e LL, respectivamente estavam ocupadas por água até 0,20 m (Figura 4A, D, G). Nesta mesma área, profundidades 0,20-0,40 m cerca de 82,25% e 84,34 % da PT estava preenchida com água nas zonas coroamento e tráfego, respectivamente, comportamento parecido ocorreu em 0,40-0,60 m onde os poros cheios de água foram na ordem de 87,21% e 72,48% para as zonas coroamento e tráfego, respectivamente.

Na área P2 houve variação $10,23\% \leq PA \leq 15,05\%$ na zona de tráfego, sendo que na zona de coroamento apenas em jan/2022 a PA foi maior 10% até 0,20 m. Na profundidade 0,20-0,40 m nos meses mais chuvosos a PA foi $\leq 10,03\%$ nas zonas de manejo. Em 0,40-0,60 m a PA foi superior a 12,42% na zona de tráfego e entre $8,54\% \geq PA \geq 12,06\%$ no coroamento (Figura 4B, E, H). Em P2 todas as profundidades estiveram em condições mais baixas de PA no coroamento, onde os poros cheios de água corresponderam cerca de 80,3%, 83,75%, 71,95% da porosidade total para 0-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente.

A zona de tráfego da área P3 permaneceu com a PA abaixo de 10% nos meses de jan, março e abril de 2022 até 0,20 m (Figura 4C, F, I). Na zona de coroamento a PA foi ligeiramente maior em relação ao tráfego, variando entre $10,17\% \leq PA \leq 12,55\%$. Nas profundidades subsuperficiais (0,20-0,60 m) nos meses de maior precipitação, o solo permaneceu com PA abaixo de 10% em todas as zonas de manejo, sendo que os valores mais baixos estiveram na zona de tráfego.

3.2 Estimativa da resistência a penetração de raiz

Os valores de RP foram ajustados a cinco equações em função da umidade do solo e densidade do solo (Eq. 3, 4, 5, 6 e 7). A equação que melhor estimou a RP foi a equação de regressão não linear (Eq. 4). Esta equação apresentou os valores mais adequados de indicadores estatísticos e critério de Akaike mais negativo (Tabela S1), sugerindo o melhor desempenho do modelo em diferentes áreas, zonas de manejo e profundidade de solo com palma de óleo (Tabela 4). O comportamento das curvas de resistência a penetração mostrou que o aumento da umidade do solo resulta em diminuição da resistência a penetração em todas as profundidades, demonstrando que em anos muito chuvosos a RP pode não ser uma variável adequada ao diagnóstico de compactação do solo.

Tabela 4 – Resistência a penetração de raiz ajustada a equação 4, critério de Akaike (AIC) e indicadores estatístico aplicados em áreas, zonas e profundidades do Latossolo Amarelo com palma de óleo em Santa Bárbara, Amazônia Oriental.

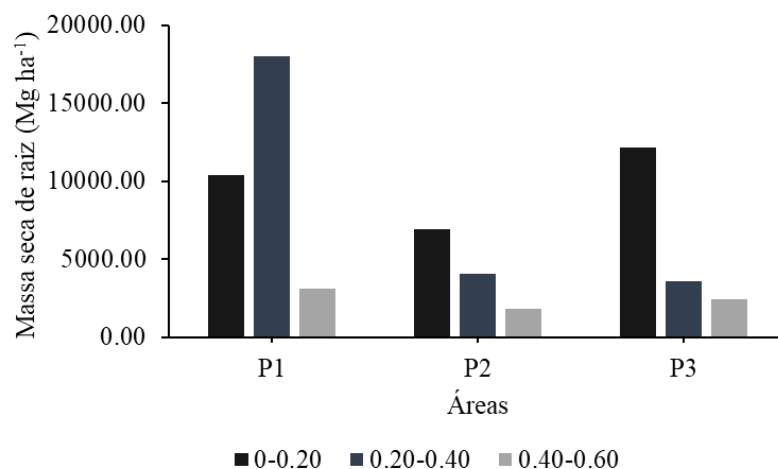
| Trimestre 1 | | | | | | | | |
|-------------|------|-----------|----------------------------------|--------|----------------|-------------------|------|------|
| Área | Zona | Prof. (m) | Equação 4 | AIC | R ² | R ² aj | EM | RMSE |
| P1 | LL | 0-0,20 | RP = 2,79*(1-θ) ^{3,84} | -15,76 | 0,65 | 0,65 | 0,00 | 0,09 |
| | | 0,20-0,40 | RP = 14,35*(1-θ) ^{6,27} | 14,08 | 0,57 | 0,57 | 0,00 | 0,40 |
| | | 0,40-0,60 | RP = 4,45*(1-θ) ^{2,68} | 17,76 | 0,15 | 0,15 | 0,00 | 0,45 |
| P2 | LL | 0-0,20 | RP = 1,31*(1-θ) ^{1,85} | -5,71 | 0,50 | 0,50 | 0,00 | 0,23 |
| | | 0,20-0,40 | RP = 9,58*(1-θ) ^{4,99} | 10,62 | 0,64 | 0,64 | 0,00 | 0,32 |
| | | 0,40-0,60 | RP = 13,81*(1-θ) ^{7,86} | 0,73 | 0,77 | 0,77 | 0,00 | 0,21 |
| Trimestre 2 | | | | | | | | |
| P1 | P | 0-0,20 | RP = 3,55*(1-θ) ^{3,67} | -16,16 | 0,70 | 0,70 | 0,00 | 0,10 |
| | | 0,20-0,40 | RP = 7,85*(1-θ) ^{3,95} | 13,32 | 0,43 | 0,43 | 0,00 | 0,37 |
| | | 0,40-0,60 | RP = 3,17*(1-θ) ^{1,01} | -14,88 | 0,46 | 0,46 | 0,00 | 0,10 |
| Trimestre 3 | | | | | | | | |
| P2 | LL | 0-0,20 | RP = 0,93*(1-θ) ^{1,37} | -20,55 | 0,67 | 0,67 | 0,00 | 0,06 |
| | | 0,20-0,40 | RP = 3,18*(1-θ) ^{1,45} | -4,85 | 0,67 | 0,67 | 0,00 | 0,17 |
| | | 0,40-0,60 | RP = 3,80*(1-θ) ^{2,76} | 4,57 | 0,55 | 0,55 | 0,00 | 0,25 |
| P3 | P | 0-0,20 | RP = 4,58*(1-θ) ^{7,44} | -12,06 | 0,76 | 0,76 | 0,00 | 0,10 |
| | | 0,20-0,40 | RP = 3,79*(1-θ) ^{4,42} | 0,62 | 0,70 | 0,70 | 0,00 | 0,20 |
| | | 0,40-0,60 | RP = 6,37*(1-θ) ^{4,87} | 4,01 | 0,43 | 0,43 | 0,00 | 0,24 |
| Trimestre 4 | | | | | | | | |
| P2 | LL | 0-0,20 | RP = 1,47*(1-θ) ^{2,99} | -18,16 | 0,68 | 0,68 | 0,00 | 0,07 |
| | | 0,20-0,40 | RP = 2,98*(1-θ) ^{1,89} | -3,88 | 0,60 | 0,60 | 0,00 | 0,17 |
| | | 0,40-0,60 | RP = 7,35*(1-θ) ^{4,94} | 11,37 | 0,68 | 0,68 | 0,00 | 0,33 |

Onde, RP é a resistência a penetração de raiz (MPa), θ é a umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$). Os trimestres, áreas e zonas apresentados foram definidos por sorteio dentro do banco de dados total.

3.3 Propriedades do solo relacionadas massa seca de raiz

A área P1 apresentou a maior massa seca de raiz (18012,96 Mg ha⁻¹) na profundidade 0,20-0,40 m, sendo superior a profundidade superficial 48,2% (Figura 5). As áreas P2 e P3 apresentaram a maior massa radicular na profundidade 0-0,20 m, superior 41,40% e 70,61% comparada a profundidade 0,20-0,40 m, respectivamente. Em todas as áreas a menor massa radicular ocorreu em 0,40-0,60 m.

Figura 5 – Massa seca de raiz dos plantios de 1999 (P1), 2013 (P2) e 2017 (P3) em três profundidades de solos com palma de óleo em Santa Bárbara do Pará, Amazônia Oriental



A relação da massa seca de raízes com as propriedades físicas do solo foi demonstrada através da análise de componentes principais (PCA). As componentes principais, PC1 e PC2 explicaram juntas 57,09%, 61,33%, 69,13% da variabilidade dos dados nas áreas P1, P2 e P3, respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4 – Resumo da análise multivariada das propriedades físicas do solo e massa seca radicular de híbridos de palma de óleo.

| Componentes principais | PC1 ^a | PC2 | PC3 | PC4 |
|------------------------|------------------|-------|-------|-------|
| P1 | | | | |
| Autovalor | 2,18 | 1,82 | 1,44 | 0,82 |
| Variância explicada | 31,12 | 57,09 | 77,66 | 89,37 |
| Variável | Correlação | | | |
| Areia | -0,80 | 0,31 | 0,42 | 0,44 |
| Argila | 0,66 | -0,53 | 0,47 | 0,06 |
| Silte | 0,13 | 0,24 | -0,95 | -0,11 |
| ρ_b^b | 0,07 | 0,61 | 0,00 | 0,76 |
| RP ^c | 0,88 | 0,27 | 0,02 | -0,15 |
| PA ^d | 0,54 | 0,64 | 0,28 | -0,17 |
| Raiz | -0,08 | 0,72 | 0,23 | -0,45 |
| P2 | | | | |
| Autovalor | 2,99 | 1,31 | 1,16 | 7,25 |
| Variância explicada | 42,69 | 61,33 | 77,87 | 88,22 |
| Areia | -0,92 | -0,26 | 0,04 | 0,09 |
| Argila | 0,92 | 0,03 | 0,30 | -0,03 |
| Silte | 0,07 | 0,55 | -0,79 | -0,14 |
| ρ_b | 0,61 | 0,28 | -0,19 | 0,56 |
| RP | 0,70 | -0,53 | -0,02 | 0,22 |
| PA | 0,03 | 0,73 | 0,63 | -0,08 |
| Raiz | -0,65 | 0,21 | 0,11 | 0,57 |
| P3 | | | | |
| Autovalor | 3,48 | 1,36 | 9,54 | 6,14 |
| Variância explicada | 49,75 | 69,13 | 82,75 | 91,52 |
| Areia | 0,85 | -0,45 | 0,19 | -0,20 |
| Argila | -0,84 | 0,00 | -0,11 | 0,53 |
| Silte | -0,35 | 0,83 | -0,20 | -0,37 |
| ρ_b | 0,08 | 0,49 | 0,86 | 0,14 |
| RP | -0,89 | -0,17 | 0,01 | -0,21 |
| PA | 0,76 | 0,28 | -0,28 | 0,27 |
| Raiz | 0,74 | 0,36 | -0,23 | 0,10 |

^aComponente principal; ^bdensidade do solo; ^cResistência a penetração de raiz; ^dPorosidade de aeração.

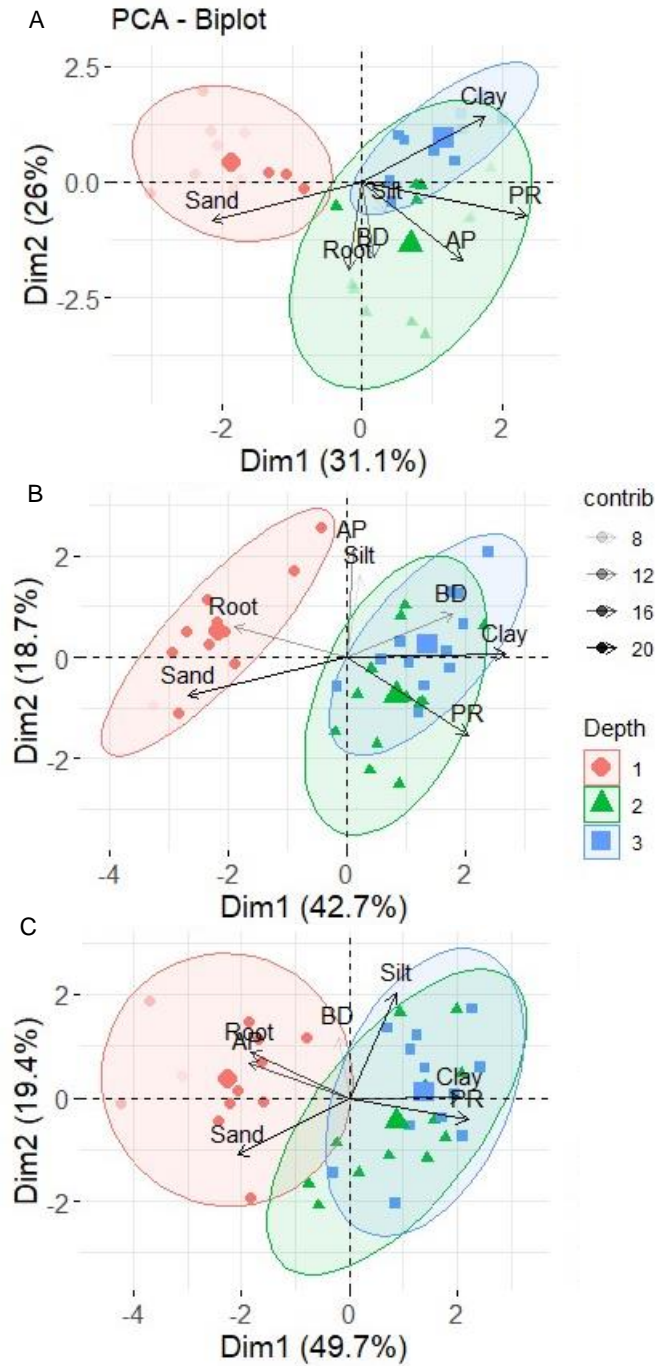
Na área P1 a PC1 explicou 31,12% da variação dos dados e foi composta pelas variáveis RP, PA e argila que apresentaram correlação positiva, sendo que a areia teve correlação negativa. A PC2 explicou 25,97%, onde a massa seca de raiz (Raiz), PA e densidade do solo (ρ_b = BD) tiveram correlação positiva e a argila correlação negativa.

A PC1 explicou 42,69% da variação na área P2, onde as variáveis mais explicativas foram argila, densidade do solo e RP, que se correlacionaram positivamente, a areia e a massa seca de raiz apresentaram correlação negativa. A PC2 explicou 18,64% da variação em P2, com maior interação positiva da PA e silte e correlação negativa para a RP (Tabela 4).

A PC1 explicou 49,75% da variabilidade da área P3, onde areia, PA e massa seca de raiz apresentaram correlação positiva, sendo que argila e RP se correlacionaram negativamente. A PC2 explicou 19,38%, tendo silte e densidade do solo com maiores pesos, ambos correlacionaram positivamente (Tabela 4). A PCA separou as profundidades do solo com maior

quantitativo de massa seca de raiz, onde as elipses que representaram as profundidades 0,20-0,40 m (verde) e 0,40-0,60 m (azul) estiveram sobrepostas em todas as áreas, indicando que nessas profundidades houve menos massa radicular, pois, a elipse mais isolada, que correspondia a profundidade 0-0,20 m (vermelha) esteve sempre associada a maior massa seca de raiz (Figura 6).

Figura 6 – Dimensões multivariadas da massa seca de raiz (Raiz) e propriedades físicas de solos com palma de óleo em Santa Bárbara do Pará, Amazônia Oriental. Gráficos biplots mostrando a Área 1 (A), Área 2 (B) e Área 3 (C), que correspondem aos replantios de 1999, 2013 e 2017, respectivamente. O círculo e pontos vermelhos, verdes e azuis estão relacionados a interação na profundidade 0-0,20 m (1), 0,20-0,40 m (2) e 0,40-0,60 m (3), respectivamente



onde, $BD = \rho_b$ é a densidade do solo; PA é a porosidade de aeração e RP a resistência a penetração de raiz

4 Discussão

A resistência a penetração e a porosidade de aeração nos trimestres avaliados foram influenciadas pela umidade do solo nas zonas de manejo em plantios com híbridos de palma de óleo. A ausência de diferenças entre as zonas de manejo para a resistência a penetração sugere que a alta precipitação em todas as áreas levou a uniformização dos resultados em superfície. A ausência de ações de revolvimento do solo (aração e gradagem) por longos períodos, e o tráfego de máquinas contínuo são os principais agentes causadores de compactação em subsuperfície de solos com palma de óleo.

As maiores resistências a penetração estiveram na zona de tráfego de máquinas em períodos em que o solo esteve menos úmido (jun, ago e set 2021), revelando o efeito cumulativo do tráfego agrícola, devido ao manejo da cultura, principalmente em profundidades subsuperficiais ($> 0,20$ m). Pesquisas anteriores evidenciaram impactos negativos do tráfego agrícola na resistência a penetração de raízes de solos com palma de óleo (Sato et al., 2017; Zuraidah et al., 2019; de Oliveira et al., 2022).

Os valores de resistência a penetração geralmente menor que 2,0 Mpa foram relacionados a alta umidade do solo, mantida por chuvas frequentes durante os trimestres. Nos meses mais chuvosos, a umidade dos solos esteve acima da capacidade de campo. Em condições úmidas a água exerce um papel lubrificante entre as partículas do solo, diminuindo a coesão e consequentemente a resistência a penetração (Shah et al., 2017). Assim, nas condições em que estudamos o fato de a resistência a penetração não apresentar valores críticos, não significa que este solo não está compactado. Até porque a compactação do solo foi evidenciada pela baixa porosidade de aeração, que provavelmente é o fator mais limitante ao desenvolvimento e manejo da cultura.

Valores altos de RP e baixa porosidade de aeração no coroamento estão vinculados ao fato da posição das linhas de plantio não mudar ao longo das renovações, o que potencializa os efeitos cumulativos do manejo nessa zona, além disso, quando a zona de tráfego está alagada, o trator na cambitagem tende a trafegar no sentido do coroamento para evitar atoleiro, o que também contribui com a compactação do solo nesta zona.

A resistência a penetração aumentou em profundidade em todas as zonas de manejo, indicando haver uma camada mais densa e com menor macroporosidade, o que possivelmente afetou a função de condutividade hidráulica do solo, que pode ser observado devido ao acúmulo de água em superfície, principalmente na zona de tráfego. O tráfego agrícola com elevada carga

por eixo em condições úmidas provoca a compactação do solo em maiores profundidades (Ansorge e Godwin, 2007). A compactação do solo descreve os efeitos combinados de processos de deformação, dos quais compressão e distorção dos poros são os mais observados (ten Damme et al., 2021). A compressão consiste no aumento de massa de solo por unidade de volume de poros em detrimento de pressões aplicadas (Reichert et al., 2010; Schjønning et al., 2013), e a distorção dos poros ocorre devido a deformação do solo sujeito a forças que agem e provocam deslocamento em planos diferentes, mantendo o volume constante, mas provocando a descontinuidade dos poros (Horn et al., 2003).

Os maiores valores de resistência a penetração na faixa entre 0,40-0,50 m estão associados à ausência de revolvimento do solo em profundidade e ao tráfego sucessivo de máquinas e implementos para a colheita (cambitagem), roçagem e adubações, em especial quando o solo estava com acima do limite úmido máximo de compactação. A cambitagem ocorreu mensalmente em algumas áreas com excesso de umidade no solo, configurando condição ideal para a compactação em subsuperfície. O conjunto trator e carreta basculhante carregada de cachos frescos exercem 6,42 kgf na superfície do solo, essa força imprime pressões que afetam a estrutura do solo em superfície, culminando em descontinuidade dos poros (Horn et al., 2003). Keller et al. (2019) constataram que o aumento do peso das máquinas agrícolas nos últimos 60 anos resultou em maior compactação em subsuperfície, diminuição da condutividade hidráulica saturado e armazenamento de água, bem como, apresentaram evidências de que o efeito para as plantas foi a diminuição do alongamento radicular.

No trimestre 1 a resistência a penetração foi superior 2,5 MPa nas áreas P1 e P3, o que possivelmente diminuiu o alongamento radicular do dendezeiro na profundidade 0,20-0,40 m. Os valores críticos de resistência a penetração para as diversas culturas variam de 1,5 a 3,5 MPa (Bengough et al., 2011; Moraes et al., 2014). Para a palma de óleo, Sato et al. (2017) atribuíram como críticos valores acima de 2,5 MPa. As médias de resistência a penetração apresentaram valores inferiores ao crítico provocada pela alta umidade do solo, que foi sustentada por precipitações trimestrais acima de 330,13 mm. Embora a massa de raízes diminua com o aumento da resistência a penetração em profundidade, os valores de RP abaixo do crítico, evidenciam que as restrições ao desenvolvimento radicular podem estar associadas a outras variáveis, como a porosidade de aeração que em períodos muitos chuvosos estiveram abaixo de 10%, limite crítico ao desenvolvimento da maioria das culturas (Lipiec e Hatano, 2003).

A relação não linear entre a resistência a penetração e a umidade do solo já foi relatada em diversos estudos (Bengough et al., 2011; Vaz et al., 2011; Shah et al., 2017; Liu et al., 2022),

reforçando a importância de avaliações temporais da umidade do solo e de propriedades físicas, que estão diretamente relacionadas ao crescimento da palma de óleo. Em solos com agricultura intensa os efeitos de períodos de seca aumentaram a resistência a penetração de raízes com limitações ao crescimento da palma de óleo em solos secos (Sato et al., 2017). Na Amazônia períodos de secas prolongados estão cada vez mais comum, desencadeados pelas mudanças climáticas (IPAM, 2023).

A redução da porosidade de aeração foi acentuada nos meses chuvosos, em especial em zonas onde a baixa macroporosidade afetou a infiltração e drenagem do solo (de Souza et al., 2023). Os solos compactados oferecem condições limitadas ao crescimento dos vegetais devido à baixa aeração no solo (Liu et al., 2022). Isso corrobora com descobertas anteriores de que a compactação diminui os macroporos, a descontinuidade dos poros e diminuição severa do transporte e fluxo de gases (Horn et al., 2003; Longepierri et al., 2021; Castioni et al., 2021; Santos et al., 2021). Zuraidah et al. (2011) descobriram que o tráfego de máquinas por ocasião da colheita dos cachos de palma de óleo diminuiu a porosidade total e o diâmetro de macroporos. Essa condição reduz a capacidade do solo de fornecer oxigênio para as raízes e organismos do solo (Reiser et al., 2020).

Condições anóxicas afetam o crescimento e desenvolvimento das plantas, isso porque a falta de oxigênio disponível para as raízes ocasiona a diminuição da taxa de crescimento radicular (Colombi et al., 2018; Longepierri et al., 2021), culminando em sistemas radiculares muito superficiais, e pouco eficientes para a sustentação das plantas, o que pode explicar os eventos recorrentes de tombamentos de plantas na área P1.

A baixa porosidade de aeração no coroamento até 0,20 m, possivelmente diminuiu a ação dos microrganismos do solo, que normalmente são mais abundantes nesta zona por conta da maior biomassa de raízes (Corley e Tinker, 2015). A porosidade cheia de água diminui a difusão de gases, como o oxigênio e nitrogênio, que são essenciais para os processos biológicos no solo. Assim, quanto menor a aeração no solo, menor o movimento desses gases, dificultando a respiração radicular, microbiana e diminuindo atividades aeróbicas, como a nitrificação e mineralização (Li et al., 2004; Tan et al., 2007). Longepierri et al. (2021) estudando as propriedades físicas do solo compactado, pontuaram que a compactação aumentou a densidade do solo na superfície e reduziu substancialmente a permeabilidade ao ar (60–63%) e a difusão de gases (59–66%).

O ajuste de RP e umidade do solo foi realizado como forma de diagnosticar a compactação do solo com palma de óleo. No entanto, o período estudado foi muito chuvoso e

houve pouca variação de umidade nos solos, sendo o conteúdo de água ajustado a resistência a penetração com umidades próximo a capacidade de campo. A equação 4 foi a que melhor se adequou aos dados, mostrando a diminuição exponencial da resistência a penetração em função da umidade do solo. As equações que tinham a densidade do solo como variável independente não apresentaram bons ajustes, devido à baixa variabilidade da densidade do solo nas zonas de manejo.

Nas condições mais úmidas ficou pouco evidentes diferenças para a resistência a penetração entre as zonas de manejo nos trimestres. Peixoto et al. (2020) estudando a resistência a penetração para diagnóstico de compactação mostraram que quanto maior o conteúdo de água no solo, menos diferenças para a resistência a penetração houve entre diferentes sistemas de manejo e vegetação nativa. Outros estudos corroboram nossos resultados, mostrando que a determinação de resistência a penetração próximo a capacidade de campo não foi adequada como indicador da compactação do solo, não sendo possível também observar o efeito do manejo na resistência a penetração (Reinert et al., 2001; Assis et al., 2009; Moraes et al., 2014; Catania et al., 2018). Assim, para a identificação de problemas de compactação no comprometimento das culturas usando a resistência a penetração, as medições devem ser feitas em solos com umidade variáveis e mais secos.

O uso da RP dentro de um programa de monitoramento da produtividade da palma precisa ser mais criterioso, estudos futuros podem ser desenvolvidos em talhões de máxima produtividade comparado a talhões de baixa produtividade. Além disso, outras propriedades do solo devem ser avaliadas e relacionadas ao crescimento das plantas, como a fertilidade do solo, pragas ou doenças, clima e características dos híbridos. Caso estas variáveis não forem limitantes para a produção da palma e a resistência a penetração sim, então o uso da resistência a penetração para o monitoramento da produtividade da palma estará adequado.

Na área P1 a massa de raiz foi mais abundante em 0,20-0,40 m, possivelmente pela maior aeração nessa profundidade, próximo ao estipe. Nas outras áreas, os maiores valores de massa seca de raízes estavam na superfície dos solos, associada aos maiores teores de areia, bem como, o aumento da profundidade e conteúdo de argila estiveram associados a maior resistência a penetração de raízes. Solos mais arenosos possuem maior espaço entre as partículas, que favorecem o alongamento radicular. Em solo franco arenoso, Pérez-Sato et al. (2023) observaram crescimento constante de biomassa radicular a partir do estipe da palma de óleo em 3 m de raio até 0,20 m de profundidade. Cerca de 90% do crescimento das raízes laterais da palma de óleo ocorreu até 0,30 m de profundidade em solos arenosos (Safriti et al.,

2017). Outros estudos mostraram que em profundidades e maior contribuição de argila houve maior resistência a penetração de raízes no solo (Nelson et al., 2006; Vaz et al., 2011; Souza et al., 2023).

Os menores valores de massa seca de raízes nas profundidades subsuperficiais indicaram impedimentos físicos para o crescimento radicular, o que é reforçado pela correlação inversa entre a resistência a penetração e a massa seca radicular. Raízes de cerca um metro de comprimento ocorrem em toda as direções, mas estão em maior concentração no ponto de emergência do estipe (Corley e Tinker, 2015). As raízes secundárias e terciárias da palma de óleo são mais abundantes na profundidade de 0-0,20 m no raio de extensão a partir do estipe, que varia de 2,5 a 4,5 m (Intara et al., 2018).

A relação multivariada mostrou que em julho/2021 a resistência a penetração impactou negativamente na massa seca de raízes em todas as áreas, diferente da porosidade de aeração. Esse comportamento, possivelmente modificou em trimestres posteriores devido a maior pluviosidade e umidade do solo, que diminui valores críticos de resistência a penetração e neste cenário, a porosidade de aeração torna-se a variável mais crítica e passível de afetar o crescimento radicular.

O acompanhamento mais detalhado do crescimento radicular ao longo do tempo pode ser feito nas áreas para que se possa afirmar certamente que o desenvolvimento radicular da palma de óleo sofre com a baixa aeração do solo. Poucos estudos relacionam a aeração do solo com o desenvolvimento desta cultura. Mas, estudos anteriores apontam certa resistência da palma de óleo a condições úmidas e associam esse comportamento a origem genética dos híbridos, no caso as regiões tropical e subtropical. No entanto, a palma de óleo não possui raízes pneumáticas ou respiratórias, como os vegetais que vivem naturalmente em solos alagados, sua adaptação é para solos úmidos, mas não permanentemente alagado (Corley e Tinker, 2015).

Os valores críticos de RP e PA ao longo do período avaliado são efeitos do processo de compactação do solo com palma de óleo. O fato de o excesso de chuvas ter mantido o solo com umidade elevada demonstrou que o impedimento mecânico ao crescimento de raízes pode não ter sido o fator limitante e sim a porosidade de aeração reduzida.

5 Conclusão

A alta precipitação aumentou a umidade do solo, o que influenciou a diminuição da resistência a penetração de raiz, mas o processo de compactação ficou evidente devido a diminuição da porosidade ao ar para valores críticos, o que possivelmente limitou o crescimento

da palma de óleo nas áreas estudadas, em acordo com a hipótese deste estudo. A resistência a penetração aumentou em profundidades subsuperficiais e apresentou valores críticos ao crescimento da palma de óleo no trimestre 1, profundidade 0,20-0,40 m. A ausência de revolvimento do solo e o tráfego de máquinas contínuo são os principais agentes causadores de compactação em subsuperfície de solos com palma de óleo. Os impedimentos físicos ao crescimento radicular ocorreram em todas as áreas, principalmente na mais antiga e na zona de tráfego de máquinas, porque os efeitos da compactação foram refletidos pela baixa porosidade de aeração do solo e acúmulo de água na superfície do solo. No cenário de menos precipitação, e solo mais seco a resistência a penetração influenciou negativamente a massa seca de raízes no início do estudo.

Foi proposto o uso de equações de ajuste da resistência a penetração de raiz em função da umidade do solo para o diagnóstico e monitoramento da compactação do solo com palma de óleo. O modelo mais adequado as áreas de estudo (Equação 4) pode ser utilizado em outras áreas com palma de óleo de regiões tropicais para o diagnóstico de compactação, e quanto à adoção de métodos mitigadores da compactação do solo. Os efeitos da compactação no solo podem ser minimizados pelos agricultores através do manejo, ao adotar o tráfego contínuo na mesma linha, uso de pneus de baixa pressão, cultivar espécies descompactadoras como cobertura do solo, e monitorar a umidade do solo para evitar o tráfego em condições de solo úmido.

Referências

- Akaike, H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In: PETROV, B.N.; CSAKI, F. (editors). 2nd International Symposium on Information Theory. Budapest, Hungary: Akadémiai Kiadó, 1973. p. 267-281.
- Ansorge D, Godwin RJ (2007) The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction, part 1: single axle-studies. *Biosyst Eng* 98:115–126. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.06.005>
- Assis RL, Lazarini GD, Lancas KP, Cargnelutti Filho A (2009) Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. *Eng Agríc* 29: 558-568. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000400006>
- Batey T (2009) Soil compaction and soil management—a review. *Soil Use Manag* 25: 335–345. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x>
- Bengough AG, McKenzie B, Hallett P, Valentine T (2011) Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J Exp Bot* 62: 59–68. doi:10.1093/jxb/erq350

- Beutler AN, Centurion JF, Centurion MAPC, Freddi OS, Sousa Neto EL, Leonel CL, Silva AP (2007) Traffic soil compaction of an Oxisol related to soybean development and yield. *Sci Agrar* 64: 608-615. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162007000600008>
- Blake GR and Hartage KH (1986a) Bulk density. In: Klute A, editor. *Method Soil Anal Part I Phys Mineral Methods*. 2nd ed. American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison, pp 363-375.
- Blake GR and Hartage KH (1986b). Particle density. In: Klute CA, editor. *Method Soil Anal Part I Phys Mineral Methods*. 2nd ed. American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison, pp 377-382.
- Böhm W (1979) *Methods of studying root systems*. Springer-Verlag, Berlin.
- Busscher WJ (1990) Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transactions of the ASAE* 33(2): 519-524. doi: 10.13031/2013.31360
- Busscher WJ, Bauer PJ, Camp CR, Sojka RE (1997) Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil Tillage Res* 43(3-4): 205-217, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00015-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00015-9)
- Carr MKV (2011) The water relations and irrigation requirements of oil palm (*Elaeis guineensis*): A review. *Expl Agric* 47(4): 629–652. <https://doi.org/10.1017/S0014479711000494>
- Castioni GAF, de Lima RP, Cherubin MR, Bordonal RO, Rolim MM, Carvalho JLN (2021) Machinery traffic in sugarcane straw removal operation: stress transmitted and soil compaction. *Soil Tillage Res* 213:105122. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105122>
- Catania P, Badalucco L, Laudicina VA, Vallone M (2018) Effects of tilling methods on soil penetration resistance, organic carbon and water stable aggregates in a vineyard of semiarid Mediterranean environment. *Environ Earth Sci* 77:348-356. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7520-5>
- Colombi T, Torres LC, Walter A, Keller T (2018) Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. *Sci Total Environ* 626: 1026–1035. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129>
- Colombi T, Keller T (2019) Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction—A plant eco-physiological perspective. *Soil Tillage Res* 191: 156–161. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.008>
- Colombi T, Walder F, Büchi L, Sommer M, Liu K, Six J, Van Der Heijden MGA, Charles R, Keller T (2019) On-farm study reveals positive relationship between gas transport capacity and organic carbon content in arable soil. *SOIL* 5(1): 91–105. <https://doi.org/10.5194/soil-5-91-2019>

- Corley RHV and Tinker PBH (2015) Diseases of the oil palm: The Oil Palm. 5th. ed. Oxford: Wiley-Blackwell.
- de Oliveira RLL, Vasconcelos SS, Teixeira WG, Viana-Junior AB, Castellani DC, Kato OR (2022) Management practices affect soil carbon and physical quality in oil palm agroforestry systems in the Amazon. *J Soil Sci Plant Nutr.* <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00947-0>
- de Souza AS, Schöngart J, de Lima RMB, Ferraz JBS, Ferreira MJ (2023) Understanding the effects of topographic characteristics on site quality in a *Bertholletia excelsa* Bonpl. Plantation in Amazonas. *New Forests* 54:439–465. <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09930-0>
- de Souza PR, de Lima HV, da Silva GB, Moura A dos S (2023) Limiting Water Content for Compaction Induced by Mechanized Operations in the Soil with Oil Palm in the Eastern Amazon. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01474-2>
- Dresbøll DB, Thorup-Kristensen K, McKenzie, BM, Dupuy LX, Bengough AG (2013) Timelapse scanning reveals spatial variation in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) root elongation rates during partial waterlogging. *Plant Soil* 369: 467–477. Doi 10.1007/s11104-013-1592-5.
- FALKER Automação Agrícola Ltda. (2009) Manual Medidor Eletrônico de Compactação do Solo - penetroLOG PLG1020. Revisão F. 2009. Cód. 41-0001.1020.06-1
- FOOD OF AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy, 2015. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/items/f16010ce-1874-4108-bd03-a6a592e2e53a> Acesso em: 08 de maio de 2024.
- Gee GW and Bauder JW (1986) Particicle-size Analysis. In: Klute CA, editor. *Methods soil Anal.* 2nd ed. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison pp 383-411.
- Gysi M, Ott A, Flühler H (1999) Influence of single passes with high wheel load on a structured, unploughed sandy loam soil. *Soil Tillage Res* 52:141–51. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00066-5)
- Hamza MA and Anderson WK (2005) Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res* 82:121–45. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Horn R and Smucker A (2005) Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil Tillage Res* 82:5–14. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.01.002>

- Horn R, Way TR, Rostek J (2003) Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil Tillage Res* 73:101–106. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00103-X)
- Intara YI, Nusantara AD, Supanjani, Caniago Z, Ekawita R (2018) Oil Palm Roots Architecture in Response to Soil Humidity. *Internations Journal of Oil Palm* 1:2. ISSN: 2614-2376
- IPAM (2023) Tudo o que você queria saber sobre fogo na Amazônia, mas não sabia para quem perguntar. (Português) Available via DIALOG <https://ipam.org.br/cartilhas-ipam> Accessed 21 nov 2023.
- Jakobsen BF and Dexter AR (1987) Effect of soil structure on wheat root growth. Water uptake and grain yield. A computer simulation model. *Soil Tillage Res* 10(4): 331- 345. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(87\)90022-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(87)90022-5)
- Keller T, Sandina M, Colombi T, Horn R, Or D (2019) Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil Tillage Res* 194:104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Kuncoro P, Koga K, Satta N, Muto Y (2014) A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity. *Soil Tillage Res* 143:172–179. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.02.006>
- Lal, R. (2003) Soil Erosion and the Global Carbon Budget. *Environmental International*, 29, 437-450. [http://dx.doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00192-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00192-7)
- Li Q, Lee Allen H, Wollum AG (2004) Microbial biomass and bacterial functional diversity in forest soils: effects of organic matter removal, compaction, and vegetation control. *Soil Biol Biochem* 36:571–9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.12.001>
- Lipiec J and Hatano R (2003) Quantification of compaction effects on soil physical Properties and crop growth. *Geoderma* 116:107–136. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00097-1)
- Liu H, Colombi T, Jäck O, Keller T, Weih M (2022) Effects of soil compaction on grain yield of wheat depend on weather conditions. *Sci Total Environ* 807:150763. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150763>
- Longepierre M, Widmer F, Keller T, Weisskopf P, Colombi T, Six J, Hartmann M (2021) Limited resilience of the soil microbiome to mechanical compaction within four growing seasons of agricultural management. *ISME Communications* 1:44. <https://doi.org/10.1038/s43705-021-00046-8>
- Mielke LN, Powers WL, Badri S, Jones AJ (1994) Estimating soil water content from soil strength. *Soil Tillage Res* 31:199-209. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(94\)90080-9](https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90080-9)
- Minasny B, Mcbratney AB, Bristow KL (1999) Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma* 93:225-253. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00061-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00061-0)

- Moraes MT, Debiasi H, Carlesso R, Franchini JC, Silva VR (2014). Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. *Rev Bras Ciênc Solo* 38: 288–298. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100029>
- Nelson DW And Sommers LE (1982) Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Madison SSS of A, editor. *Methods soil Anal Chem Microbiol Prop.* pp 539-579.
- Nelson PN, Banabas M, Scotter DR, Webb MJ (2006) Using soil water depletion to measure spatial distribution of root activity in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantations. *Plant Soil* 286:109–121. Doi:10.1007/s11104-006-9030-6
- Oliveira JM, Tormena CA, Santos GR dos, Zotarelli L, Fernandes RBA, de Oliveira, TS (2022) Soil Penetration Resistance Influenced by Eucalypt Straw Management under Mechanized Harvesting. *Agronomy* 12:1482. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061482>
- Peixoto DS, Silva BM, de Oliveira GC, Moreira SG, da Silva F, Curi N (2020) A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. *Soil and Tillage Research* 194: 104307 <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104307>
- Peralta F, Vásquez O, Rachardson DL, Alvarado A, Bornemisza E (1985) Effect of some soil physical characteristics on yield, growth and nutrition of the oil palm in Costa Rica. *Oléagineux* 40:423–430.
- Pérez-Sato M, Gómez-Gutiérrez A, Lopez-Valdez F, Ayala-Niño F, Soni-Guillermo E, González-Graillet M, Pérez-Hernández H (2023) Soil physicochemical properties change by age of the oil palm crop. *Heliyon* 9:e16302. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16302>
- R Core Team (2022) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna Austria <https://www.R-project.org/>
- Ramalho Filho A, PEF da M, PLde F, Teixeira WG (2010) Zoneamento agroecológico, produção e manejo da cultura de palma de óleo na Amazônia. Embrapa Solos, Rio de Janeiro (Português)
- Reichert JM, Reinert DJ, Suzuki L, Horn R (2010) Mecânica do solo. In: van Lier, Q.J. (Ed.), *Física do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, pp. 30–102.
- Reiser R, Stadelmann V, Weisskopf P, Grahm L, Keller T (2020) System for quasicontinuous simultaneous measurement of oxygen diffusion rate and redox potential in soil. *J Plant Nutr Soil Sci* 183:316–26. <https://doi.org/10.1002/jpln.201900518>
- Safadoust A, Feizee P, Mahboubi AA, Gharabaghi B, Mosaddeghi MR, Ahrens B (2014) Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. *Agric Water Manag* 136: 34-41. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.007>

- Safitri L, Suryanti S, Kautsar V, Kurniawan A, Santiabudi F (2018) Study of oil palm root architecture with variation of crop stage and soil type vulnerable to drought. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 141: 012031. doi :10.1088/1755-1315/141/1/012031
- Santos HG dos (2018) Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5 EMBRAPA. Brasília. ISBN 978-85-7035-817-2 (Português)
- Santos RS, Wiesmeier M, Cherubin MR, Oliveira DMS, Locatelli JL, Marquel H, Cerri CEP (2021) Consequences of land-use change in Brazil's new agricultural frontier: a soil physical health assessment. Geoderma 400:115149. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115149>
- Sato MK, Lima HV, Ferreira RL, Rodrigues S, Silva ÁP (2017) Least limiting water range for oil palm production in Amazon region, Brazil. Sci Agric 74:148–156. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2015-0408>
- Schjønning P, Lamandé M, Berisso FE, Simojoki A, Alakukku L, Andreasen RR (2013) Gas diffusion, non-Darcy air permeability, and computed tomography images of a clay subsoil affected by compaction. Soil Sci Soc Am J 77:1977–1990. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.06.0224>
- SEDAP - Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e da Pesca. Pará é destaque no cenário nacional em cinco cadeias produtivas. Disponível em: <https://www.agenciapara.com.br/noticia/40949/para-e-destaque-no-cenario-nacional-em-cinco-cadeias-produtivas>. Acesso em: 14 nov. 2023.
- Shah AN, Tanveer M, Shahzad B, Yang G, Fahad S, Bukhari MA, Tung SA, Hafeez A, Souliyanonh B (2017) Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. Environ Sci Pollut. Res. 11, 1056–1067. DOI:10.1007/s11356-017-8421-y
- Strock CF, Rangarajan H, Black CK, Schäfer ED, Lynch JP (2022) Theoretical Evidence That Root Penetration Ability Interacts with Soil Compaction Regimes to Affect Nitrate Capture. Ann Bot 129:315–330. Doi: 10.1093/aob/mcab144
- Tan X and Chang SX (2007) Soil compaction and forest litter amendment affect carbon and net nitrogen mineralization in a boreal forest soil. Soil Tillage Res. 93:77–86. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.03.017>
- ten Damme L, Schjønning P, Munkholm LJ, Green O, Nielsen SK, Lamandé M (2021) Soil structure response to field traffic: Effects of traction and repeated wheeling. Soil Tillage Res 213:105128. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105128>
- Upadhyaya SK, Kemble LJ, Collins NE, Williams TH (1982) Cone index prediction equations for Delaware soils [Dimensional analysis]. Paper-American Society of Agricultural Engineers (USA). Microfiche collection 82-1542. ISSN/ISBN: 0149-9890
- Vaz CMP, Manieri JM., de Maria IC, Tuller M (2011) Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. Geoderma 166:92–101. doi:10.1016/j.geoderma.2011.07.016

- Zuraidah Y (2019) Influence of soil compaction on oil palm yield. J Oil Palm Res 31:67–72.
<https://doi.org/10.21894/jopr.2018.0064>
- Zuraidah Y, Aminuddin H, Jamal T, Jamarei O, Osumanu HA, Mohamadu BJ (2010) Oil Palm (*Elaeis guineensis*) Roots Response to Mechanization in Bernam Series Soil. Am J Appl Sci 7(3): 343-348. ISSN 1546-9239
- Zuraidah Y, Husin A, Talib J, Othman J, Darus SZ, Ahmed OH, Jalloh MB (2011) Pores Reconfiguration in Compacted Bernam Series Soil. American Journal of Applied Sciences 8 (3): 212-216. ISSN 1546-9239

SUPLEMENTAR

Tabela S1 – Critério de Akaike e indicadores estatístico das curvas de resistência a penetração em função da umidade e densidade do solo do subconjunto de dados.

| TRIIP2LL | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|--------|--------|--------|-------|--------|-----------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------|--------|-------|-------|
| Prof (m) | 0-0,20 | | | | | 0,20-0,40 | | | | | 0,40-0,60 | | | | |
| | Eq. 3 | Eq. 4 | Eq. 5 | Eq.6 | Eq.7 | Eq. 3 | Eq. 4 | Eq. 5 | Eq.6 | Eq.7 | Eq. 3 | Eq. 4 | Eq. 5 | Eq.6 | Eq.7 |
| AIC | 2,48 | -5,71 | - | 4,91 | 30,12 | 22,74 | 10,62 | 50,59 | 25,42 | 25,42 | 16,73 | 0,73 | 29,26 | 18,73 | 18,73 |
| R ² | 0,00 | 0,50 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,64 | 0,64 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,77 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| R ² aj | 0,00 | 0,50 | 0,00 | 0,00 | -0,02 | 0,00 | 0,64 | 0,64 | -0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,77 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| EM | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,23 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| RMSE | 0,23 | 0,23 | 0,92 | 0,00 | 0,40 | 0,53 | 0,32 | 0,94 | 0,58 | 0,58 | 0,43 | 0,21 | 0,63 | 0,43 | 0,43 |
| TRIIP1LL | | | | | | | | | | | | | | | |
| AIC | -5.35 | -15.76 | -15.84 | -3.35 | 1.57 | 22.54 | 14.08 | 13.89 | 23.35 | 29.51 | 19.51 | 17.76 | 17.81 | 21.50 | 21.50 |
| R ² | 0,00 | 0,65 | 0,65 | 0,00 | 0,64 | 0,00 | 0,57 | 0,58 | 0,11 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,14 | 0,00 | 0,00 |
| R ² aj | 0,00 | 0,65 | 0,65 | -0,10 | 0,60 | 0,00 | 0,57 | 0,58 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,14 | -0,10 | 0,00 |
| EM | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| RMSE | 0,15 | 0,09 | 0,09 | 0,15 | 0,19 | 0,61 | 0,40 | 0,40 | 0,58 | 0,75 | 0,49 | 0,45 | 0,45 | 0,49 | 0,49 |
| TRI2P1P | | | | | | | | | | | | | | | |
| AIC | -1.70 | -16.16 | -11.31 | 0.46 | 12.08 | 19.44 | 13.32 | 13.36 | 21.44 | 21.44 | -8.15 | -14.88 | -14.84 | -6.15 | -6.15 |
| R ² | 0,00 | 0,70 | 0,69 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,43 | 0,42 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,46 | 0,46 | 0,00 | 0,00 |
| R ² aj | 0,00 | 0,70 | 0,69 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,43 | 0,42 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,46 | 0,46 | 0,00 | 0,00 |
| EM | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,21 | 0,21 |
| RMSE | 0,19 | 0,10 | 0,11 | 0,19 | 0,28 | 0,49 | 0,37 | 0,37 | 0,49 | 0,49 | 0,14 | 0,10 | 0,10 | 0,14 | 0,14 |
| TRI3P2LL | | | | | | | | | | | | | | | |
| AIC | -10.67 | -20.55 | 804.05 | -8.69 | 165.45 | 8.33 | -4.85 | 18.87 | 10.77 | 10.33 | 14.11 | 4.57 | 14.26 | 36.58 | 36.58 |
| R ² | 0,00 | 0,67 | 0,66 | 0,00 | 0,66 | 0,00 | 0,67 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,55 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| R ² aj | 0,00 | 0,67 | 0,66 | 0,00 | 0,66 | 0,00 | 0,67 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,55 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| EM | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,02 |
| RMSE | 0,11 | 0,06 | 0,04 | 0,11 | 0,48 | 0,29 | 0,17 | 0,13 | 0,29 | 0,29 | 0,37 | 0,25 | 0,21 | 0,61 | 0,63 |
| TRI3P3P | | | | | | | | | | | | | | | |
| AIC | 0.62 | -12.06 | 313.41 | 2.62 | 48.51 | 11.45 | 0.62 | 0.94 | 13.45 | 13.45 | 10.84 | 4.01 | 4.00 | 12.84 | 18.97 |
| R ² | 0,00 | 0,76 | 0,71 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,70 | 0,69 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,43 | 0,43 | 0,00 | 0,00 |
| R ² aj | 0,00 | 0,76 | 0,71 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,70 | 0,69 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,43 | 0,43 | 0,00 | 0,00 |
| EM | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| RMSE | 0,20 | 0,10 | 0,10 | 0,20 | 0,45 | 0,37 | 0,20 | 0,20 | 0,37 | 0,37 | 0,32 | 0,24 | 0,24 | 0,32 | 0,40 |

Tabela S1 – Continuação.

| TRI4P2LL | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|-----------|-------|-------|-------|------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| Prof (m) | 0-0,20 | | | | | 0,20-0,40 | | | | | 0,40-0,60 | | | | |
| | Eq. 3 | Eq. 4 | Eq. 5 | Eq.6 | Eq.7 | Eq. 3 | Eq. 4 | Eq. 5 | Eq.6 | Eq.7 | Eq. 3 | Eq. 4 | Eq. 5 | Eq.6 | Eq.7 |
| AIC | -7.93 | -18.16 | 813.28 | -6.45 | 177.37 | 7.01 | -3.88 | 7.01 | 10.31 | 7.97 | 24.97 | 11.37 | 25.06 | 26.97 | 26.97 |
| R ² | 0,00 | 0,68 | 0,68 | 0,09 | 0,68 | 0,00 | 0,60 | 0,00 | 0,09 | 0,10 | 0,00 | 0,68 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| R ² _{aj} | 0,00 | 0,68 | 0,68 | 0,09 | 0,68 | 0,00 | 0,60 | 0,00 | 0,09 | 0,10 | 0,00 | 0,68 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| EM | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| RMSE | 0,12 | 0,07 | 0,03 | 0,12 | 0,58 | 0,27 | 0,17 | 0,13 | 0,19 | 0,26 | 0,58 | 0,33 | 0,21 | 0,58 | 0,61 |

CAPÍTULO 3 - DECOMPOSIÇÃO E LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES DE RESÍDUOS DE PALMA DE ÓLEO EM SOLO DE TEXTURA ARENOSA

RESUMO

A cadeia produtiva do óleo de palma é responsável pela geração de grandes receitas econômicas e de resíduos orgânicos. Assim, os objetivos foram (i) avaliar a decomposição e a mineralização de resíduos de palma de óleo em solo de textura arenosa ao longo de 0,30 ano de incubação; (ii) analisar a contribuição destes resíduos nas frações físicas da matéria orgânica e disponibilidade de macronutrientes. O experimento de incubação foi conduzido em condições controladas ($\pm 26,7$ °C). Os tratamentos foram em esquema fatorial (4 resíduos x 6 tempos) + 1; os resíduos foram pecíolo (PT), folíolo (FT), engaço (EFB), MIX dos resíduos, e o solo sem resíduo; os tempos de incubação (0, 0,04, 0,08, 0,12, 0,16, 0,22 e 0,30 ano), distribuídos em quatro blocos casualizados. O fluxo de C-CO₂ foi monitorado e as taxas de decomposição foram estimadas através do ajuste de modelos de regressão não linear. A quantidade e porcentagem de nutrientes mineralizadas e as frações físicas da matéria orgânica foram analisados ao final. As emissões de C-CO₂ acumuladas decresceram nos tratamentos EFB > MIX > FT > PT > solo sem resíduo. Houve imobilização, principalmente de nitrogênio do solo. O nutriente mais mineralizado foi o potássio. Não houve diferença entre os resíduos para o carbono das frações da matéria orgânica, mas houve aumento das concentrações finais, diferente do nitrogênio que diminuiu nas frações. Os baixos teores de N, alta relação C/N inicial dos resíduos e presença de compostos mais recalcitrantes impactaram a decomposição dos resíduos em curto prazo, indicando a necessidade de maior tempo para maior mineralização dos nutrientes.

Palavras-chave: Matéria orgânica, mineralização, macronutrientes.

DECOMPOSITION AND NUTRIENT RELEASE OF OIL PALM RESIDUES IN SANDY TEXTURE SOIL

ABSTRACT

The palm oil production chain is responsible for generating large amounts of economic revenue and organic residues. Thus, the objectives were to (i) evaluate the decomposition and mineralization of oil palm residues in sandy texture soil over 0.30 year of incubation; and to (ii) analyse the contribution of these residues to the physical fractions of organic matter and the

availability of macronutrients. The incubation experiment was conducted under controlled conditions ($\pm 26,7$ °C). The treatments were factorial (4 residues x 6 times) + 1; the residues were petiole (PT), feaflets (FT), empty fruit bunches (EFB), MIX of residues, and soil without residue; the incubation times (0, 0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.22 and 0.30 year), distributed in four randomized blocks at B.O.D. C-CO₂ flux was monitored and decomposition rates were estimated by fitting non-linear regression models. The amount and percentage of mineralized nutrients and the physical fractions of the organic matter were analyzed at the end. Accumulated C-CO₂ emissions decreased in the treatments EFB > MIX > FT > PT > soil free of residue. There was immobilization, especially of nitrogen from the soil. The most mineralized nutrient was potassium. There was no difference between residues for the carbon in the organic matter fractions, but there was an increase in the final concentrations, in contrast to nitrogen, which decreased in the fractions. The low N content, high initial C/N ratio of the residue and the presence of more recalcitrant compounds impacted the decomposition of the residue in the short term, indicating the need for more time for greater mineralization of nutrients.

Keywords: Organic matter; mineralization; macronutrients.

1 Introdução

O óleo de palma é uma *commodity* importante, porque representou cerca de 87,7% da produção mundial de óleo vegetais na safra 2022/2023, a frente do óleo de soja. A comercialização internacional de óleo de palma representa cerca 58% das exportações dentre os óleos vegetais (USDA, 2023). Indonésia e Malásia, países do Sudeste Asiático, respondem por 85% das exportações mundiais. Essa liderança está em declínio desde a pandemia da Covid-19, devido problema com escassez de mão-de-obra, preços de fertilizantes e atrasos na renovação das áreas. A crescente demanda mundial por óleo de palma nas últimas décadas, também intensificaram plantios de palma de óleo em áreas já desmatadas na Amazônia (RAMALHO FILHO et al., 2010), onde atualmente o estado do Pará foi responsável por 98,27% da produção nacional, com 2,9 milhões de toneladas de cachos frescos em 185,96 mil hectares no período 2022/2023 (SEDAP, 2023).

As previsões do mercado mundial são para crescimento inferior da produção de óleo de palma, associada aos impactos das mudanças climáticas, que ocasionam secas. Em especial na Amazônia, as mudanças climáticas são intensificadas pelo fenômeno El Niño (IPAM, 2023). Além disso, a degradação dos solos devido a processos de compactação e exaustão de nutrientes são recorrentes nas áreas produtoras. No estado do Pará, a maioria dos plantios estão em áreas

de Latossolo e Argissolo, de fertilidade baixa, necessitando da adição de nutrientes para o suprimento da cultura. A fertilidade do solo pode ser potencializada com a aplicação de resíduos orgânicos gerados na cadeia produtiva do óleo de palma (ANYAOHA et al., 2018; COSTA et al., 2023), possibilitando destinação sustentável.

No processo de extração do óleo de palma são gerados grande quantidade de resíduos na indústria, fora a geração de resíduo vegetal nos plantios. No processamento de uma tonelada de cachos de frutas frescas, ocorre a produção de aproximadamente 20–22% de óleo de palma, 5,5–6% de óleo de palmiste, 23–25% de engaço (*Empty fruit bunches* - EFB), 13– 15% de fibras, 6–6,5% de casca de palmiste e 15–25% umidade (OLISA et al., 2014; HANTOKO et al., 2018). Uma planta adulta pode produzir entre de 20 e 30 folhas por ano, equivalente a cerca de 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ de matéria seca, que podem retornar ao solo, a cada colheita (VIÉGAS et al., 1993). Estes materiais constituem uma importante fonte de nutrientes para o solo (ANYAOHA et al., 2018).

Os resíduos de palma de óleo foram estudados em experimentos de decomposição em campo por Moradi et al., (2014), está pesquisa mostrou quantidades de lignina acima de 200 g kg⁻¹ e alta relação C/N para pecíolos, folíolos e engaço, mesmo assim após oito meses os folíolos liberaram quantidades expressivas de macronutrientes. O nitrogênio teve liberação de 90%, 25% e 49% da concentração inicial de folíolos, pecíolos e engaço, respectivamente. O impacto de engaço no solo aumentou ao longo de 24 meses, onde nos primeiros meses houve a maior liberação de K⁺, devido este nutriente está na forma iônica no vacúolo, onde sua liberação é facilitada a partir do rompimento da membrana plasmática. Nos últimos meses houve aumentos na liberação de N, P, Ca²⁺ e Mg²⁺ (CARRON et al., 2015).

A aplicação de engaço em plantios comerciais de palma de óleo aumentou a qualidade do solo, devido à grande presença de compostos orgânicos ricos em nutrientes essenciais (BOAFO et al., 2019) e melhorou a fertilidade do solo em sistemas agroflorestais na Amazônia (RAMOS et al., 2018; COSTA et al., 2023).

Diante dos benefícios de aplicações de resíduos de palma ao solo como protetor físico, e da necessidade em diminuição de gastos com fertilizantes minerais, a utilização destes resíduos em solos amazônicos precisa ser orientada em conformidade com as características dos híbridos plantados (*Elaeis guineenses* Jacq. x *Elaeis Oleifera* (H.B.K.) Cortés) e dos solos da região. Os objetivos desta pesquisa foram: (i) avaliar a decomposição e a mineralização de resíduos de palma de óleo em solo de textura arenosa ao longo de 0,30 ano de incubação; e (ii)

analisar a contribuição de resíduos de palma de óleo nas frações físicas da matéria orgânica e disponibilidade de macronutrientes no solo de textura arenosa.

2 Material e métodos

2.1 Experimento de incubação

O experimento de incubação dos resíduos de palma de óleo foi conduzido em condições controladas de temperatura ($\pm 26,7$ °C). Os tratamentos foram compostos de um esquema fatorial $(4 \times 6) + 1$: sendo o fator 1 correspondente as frações dos resíduos (pecíolo - PT, folíolo - FT e engaço - EFB), um MIX dos resíduos e o solo sem resíduo; e o segundo fator foi o tempo de incubação (0, 0,04, 0,08, 0,12, 0,16, 0,22 e 0,30 ano de incubação). Os tratamentos foram distribuídos em quatro blocos casualizados.

O solo foi coletado na profundidade de 0-0,20 m em plantio de palma de óleo, no município de Santa Bárbara, Estado do Pará, Amazônia Oriental ($1^{\circ}15'44''$ S $48^{\circ}14'22.6''$ W). Este solo (Tabela 1) apresentou estrutura granular e textura areia franca (11,9 % argila), com histórico de cultivo convencional de palma de óleo desde 1960. O plantio atual foi instalado em 1999.

Tabela 1 – Caracterização das propriedades físicas e químicas iniciais do Latossolo Amarelo utilizado no experimento de encubação com resíduos de palma de óleo.

| Propriedades | 0-0,20 | Unidades |
|-----------------|--------------|------------------------------------|
| pH água | 5,00 | |
| Areia | 861,09 | g kg ⁻¹ |
| Silte | 29,62 | g kg ⁻¹ |
| Argila | 109,28 | g kg ⁻¹ |
| Classe textural | Areia franca | g kg ⁻¹ |
| C | 11,02 | g kg ⁻¹ |
| N | 0,65 | g kg ⁻¹ |
| P | 19,02 | g kg ⁻¹ |
| K | 0,14 | cmol _c dm ⁻³ |
| Ca | 0,74 | cmol _c dm ⁻³ |
| Mg | 0,29 | cmol _c dm ⁻³ |
| C/N | 16,95 | g kg ⁻¹ |
| C/P | 0,58 | g kg ⁻¹ |
| C MOP | 1,66 | g kg ⁻¹ |
| C MOAM | 8,57 | g kg ⁻¹ |
| N MOP | 0,08 | g kg ⁻¹ |
| N MOAM | 0,57 | g kg ⁻¹ |

O folíolo e o pecíolo foram obtidos em um plantio de palma de óleo de 24 anos e o engaço foi obtido na indústria de beneficiamento do óleo de palma. O cacho da palma de óleo após colhido passou pelo processo de cozimento para a retirada das amêndoas, a estrutura que

restou é o engaço. Estes resíduos foram levados ao laboratório, lavados em água corrente e secos em estufa de circulação forçada em 60 °C até atingirem peso constante.

As amostras de solo seco ao ar (50 g) foram colocadas em recipientes de vidro com capacidade de 0,5 L e tampa de rosca. A umidade do solo foi ajustada para 60% da capacidade de campo. Os resíduos foram fragmentados no moinho de facas em partículas > 2 cm, distribuídos sobre tela de polietileno ($\varnothing = 2$ mm) posicionada na superfície do solo dentro dos recipientes de vidro. A quantidade de resíduo adicionada em cada unidade experimental foi estabelecida com base em 2% do carbono orgânico de cada resíduo, equivalente a 1,71, 1,76 e 2,19 g para PT, FT e EFB, respectivamente (Figura 1).

Figura 1 – Frascos de vidro respirométricos com solo e resíduos de palma de óleo durante o experimento de incubação



Fonte: A autora

2.2 Coleta e determinação do fluxo de C-CO₂

Para a coleta de gases apenas os tratamentos referentes ao último tempo de incubação, ou tempo máximo de incubação (0,30 ano) foram utilizados. Os frascos respirométricos (hermeticamente fechados), foram equipados com um frasco coletor de C-CO₂ (vasilhame plástico de 30 mL) contendo 20 mL de NaOH 0,5 mol L⁻¹ (CURL e RODRIGUEZ-KABANA, 1972), para a determinação do fluxo de C-CO₂. Todos os frascos ficaram incubados a uma temperatura média de $\pm 26,7$ °C com umidade relativa do ar de 85% em B.O.D (*Biological Oxygen Demand*) (Figura 2). Durante um período de 0,30 anos, os frascos foram abertos nos períodos de 0, 4, 12, 24, 48, 72, 96 horas até a emissão de CO₂ estabilizar. A cada coleta foi pipetado 10 mL de NaOH, adicionado 2 mL de BaCl₂·2H₂O 1 mol L⁻¹ para a titulação com HCl 1 mol L⁻¹ usando fenolftaleína como indicador. A última coleta, após a estabilização de CO₂

ocorreu às 2476 h de incubação. Os recipientes foram abertos a cada sete dias durante a incubação para promover as trocas gasosas para evitar a redução da concentração de O₂, e umedecimento.

Figura 2 – Unidades experimentais de incubação de solo e resíduos de palma de óleo distribuídas dentro da B.O.D



Fonte: A autora

2.3 Massa seca remanescente e conteúdo dos nutrientes remanescentes

A massa seca remanescente (*msR*) dos resíduos de palma de óleo foi mensurada para cada tempo, 0,04, 0,08, 0,12, 0,16, 0,22, 0,30 ano em relação a massa seca inicial de cada resíduo em acordo com a equação 1:

$$msR = MSi - MSt \quad (1)$$

onde, *MSi* é a massa seca inicial do resíduo (g); *MSt* é a massa seca do resíduo após cada tempo de incubação 0,04, 0,08, 0,12, 0,16, 0,22, 0,30 ano (g). A *MSi* foi considerada como 100% da massa de cada resíduo, e ao longo do tempo foram calculadas a taxa de diminuição da massa seca remanescente em cada tempo (%).

O conteúdo de nutriente remanescente (CNR) nos resíduos de palma de óleo foram calculados em acordo com a equação 2

$$CNR = (TN * MSR)/1000 \quad (2)$$

onde, TN é o teor de nutrientes (g kg^{-1}); msR é a massa seca remanescente do resíduo aos 0,30 ano (g) de incubação, que foi obtida a partir da massa seca do resíduo após secagem em estufa 60°C até atingir massa constante; 1000 foi utilizado para transformar o resultado em mg de N, P, K, Ca e Mg.

As taxas de decomposição e mineralização dos nutrientes presentes nos resíduos de palma foram estimadas pelo ajuste não linear de regressão, testando os modelos de Olson (1963), equação 3, e Wiedner e Lang (1982), segundo equações 4, 5 e 6.

$$msR = X0^{-kt} \quad (3)$$

$$msR = A^{-kat} + (100 - A) \quad (4)$$

$$msR = A^{-kat} + (100 - A)^{-kbt} \quad (5)$$

$$msR = X0 - kt + kt^2 \quad (6)$$

onde, msR corresponde a quantidade (g) de matéria seca remanescente aos 0, 0,04, 0,08, 0,12, 0,16, 0,22 e 0,30 ano; $X0$ massa seca (g) inicial; k , ka , kb , são constantes de decomposição da massa seca, referente ao compartimento facilmente decomponível (A) e do compartimento mais recalcitrante ($100 - A$), respectivamente.

A escolha do modelo foi realizada com base no menor valor da soma dos quadrados do erro, significância dos parâmetros da equação e no maior valor do coeficiente de determinação (R^2) ajustado. A meia vida dos resíduos foi calculada com base na equação 7.

$$t_{0,5} = \frac{-\ln(0,5)}{k} = \frac{0,693}{k} \quad (7)$$

onde, $t_{0,5}$ corresponde ao tempo necessário para a decomposição de 50% do resíduo de palma de óleo (Paul e Clark, 1989).

A quantidade (QM) e a porcentagem mineralizada (PM) de cada resíduo foi calculada em acordo com as equações 8 e 9.

$$QM = Ci - Cf \quad (8)$$

$$PM = \frac{Cf * 100}{Ci} \quad (9)$$

onde, Ci é o teor inicial do nutriente (dag kg^{-1}); Cf é o teor final do nutriente (dag kg^{-1}) remanescente no resíduo de palma de óleo após 0,30 ano de incubação.

2.4 Caracterização química e bioquímica inicial dos resíduos

Os resíduos foram secos em estufa de circulação de ar em 60 °C por 72 h, pesados para obtenção da massa seca, triturados em moinho de bolas, e passados em peneira de 0,250 mm. As amostras foram utilizadas para a determinação de carbono após oxidação com dicromato de potássio em meio sulfúrico (YEOMANS e BREMNER, 1988), nitrogênio após digestão sulfúrica pelo método Kjeldahl (BREMNER e MULVANEY, 1982) e fósforo, potássio, cálcio e magnésio, após digestão nitroperclórica na proporção de 4:1 (JOHNSON e ULRICH, 1959).

A caracterização bioquímica inicial dos resíduos foi realizada através da determinação de extrativos solúveis em acetona (Tabela 2). O material insolúvel foi utilizado para a determinação de lignina solúvel, insolúvel e holocelulose (ZANUNCIO e COLODETTE, 2011).

Tabela 2 – Caracterização inicial química e bioquímica dos resíduos de palma de óleo utilizados no experimento de incubação.

| Resíduos | FT | PT | EFB |
|--|--------|--------|--------|
| Extrativos solúveis (%) | 20,85 | 11,08 | 8,88 |
| Lignina solúvel (%) | 3,12 | 3,73 | 4,45 |
| Lignina insolúvel (%) | 35,78 | 13,57 | 14,10 |
| Lignina total (%) | 38,90 | 17,30 | 18,55 |
| Holocelulose (%) | 43,37 | 79,87 | 81,72 |
| C (dag kg ⁻¹) | 56,84 | 52,73 | 46,10 |
| N (dag kg ⁻¹) | 1,31 | 0,21 | 0,53 |
| P (dag kg ⁻¹) | 0,10 | 0,12 | 0,13 |
| K ⁺ (dag kg ⁻¹) | 0,50 | 1,05 | 2,19 |
| Ca ²⁺ (dag kg ⁻¹) | 0,71 | 0,37 | 0,23 |
| Mg ²⁺ (dag kg ⁻¹) | 0,15 | 0,08 | 0,13 |
| C/N (dag kg ⁻¹) | 43,38 | 251,10 | 86,98 |
| C/P (dag kg ⁻¹) | 568,4 | 439,41 | 354,62 |
| Lignina/N | 29,69 | 82,38 | 35,00 |
| Lignina/P | 389,00 | 144,17 | 142,69 |

Onde, PT, FT e EFB, correspondem a pecíolo, folíolo e engaço, respectivamente.

2.5 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS) e quantificação dos nutrientes no solo antes e após 0,30 ano

O fracionamento físico da MOS foi realizado no início e ao final da incubação, utilizando 10 g de TFSA dispersa em 30 ml de hexametáfosfato de sódio e agitação horizontal durante 15 h (CAMBARDELLA e ELLIOTT, 1992). Após a agitação o material foi passado em peneira de 53 µm, o que ficou retido na peneira correspondeu a fração matéria orgânica particulada (MOP) e o que passou a fração de matéria orgânica associada aos minerais (MOAM). As frações foram secas separadamente em estufa à 60°C até a evaporação da água.

Depois da secagem, o material foi pesado e macerado em almofariz de ágata, passado em peneira de 100 mesh para posterior determinação de carbono e nitrogênio.

As determinações de carbono no solo foram realizadas após oxidação com dicromato de potássio em meio sulfúrico (YEOMANS e BREMNER, 1988), e do nitrogênio após digestão sulfúrica pelo método Kjeldahl (BREMNER e MULVANEY, 1982). Os nutrientes fósforo, potássio, cálcio e magnésio foram determinados após digestão nitroperclórica na proporção de 4:1 (JOHNSON e ULRICH, 1959).

2.6 Análise estatística

Para as emissões de C-CO₂ acumulada (até 0,30 ano) a normalidade dos dados foi observada através do teste Shapiro-Wilk e a homocedacidade pelo teste de Bartlett, ambos a 5% de significância. A emissão de C-CO₂ acumulada, *msR*, carbono e nitrogênio das frações MOP e MOAM, e a quantidade de macronutriente mineralizada nos tratamentos com resíduo de palma de óleo e solo exposto no tempo de 0,30 ano foram comparadas pelo teste Tukey a 5%. Os modelos de decaimento descrevendo a cinética de *msR* no tempo 0,30 ano foram ajustados por meio de regressões não linear, utilizando o software Sigma Plot versão 11.0 (Systat Software Inc., Chicago, IL, USA).

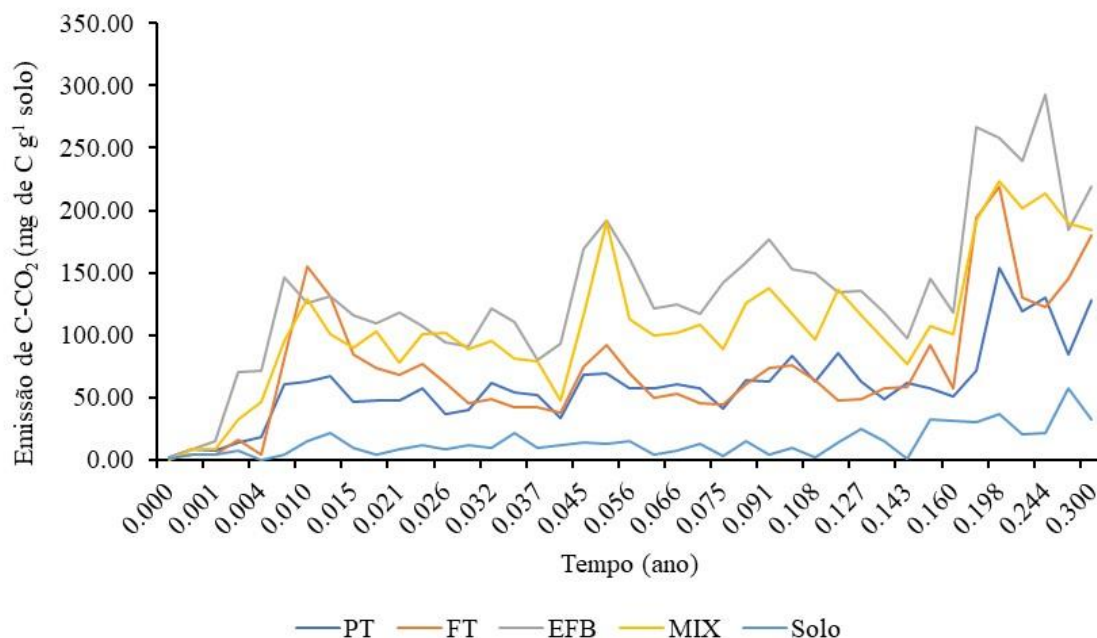
3 Resultados

3.1 Fluxos de C-CO₂

As emissões de C-CO₂ ao longo de 0,30 ano de incubação apresentaram comportamento diferente entre os resíduos de palma de óleo, pecíolo (PT), folíolo (FT), engaço (EFB), MIX (Figura 3). No tratamento controle (solo sem resíduo) foi observado as menores emissões de C-CO₂ durante todo o período de incubação. Nas primeiras 12 horas, equivalente a 0,001 ano de incubação houve pouca emissão de C-CO₂ em todos os tratamentos, mas a partir desse momento as emissões começaram a aumentar, em especial para o EFB e MIX até 0,006 ano. Após este momento as emissões de C-CO₂ começaram leve declínio nos tratamentos com FT, EFB e MIX.

A partir de 0,009 ano iniciou uma fase mais estável de emissões de C-CO₂, que perdurou até as 0,16 ano. Nesta fase as emissões aumentaram cerca 93,11% e 93,06%, para EFB e MIX em relação ao solo sem resíduo, respectivamente. Os resíduos FT e PT apresentaram emissões de C-CO₂ semelhantes, e na maior parte da incubação houve mais emissão no FT.

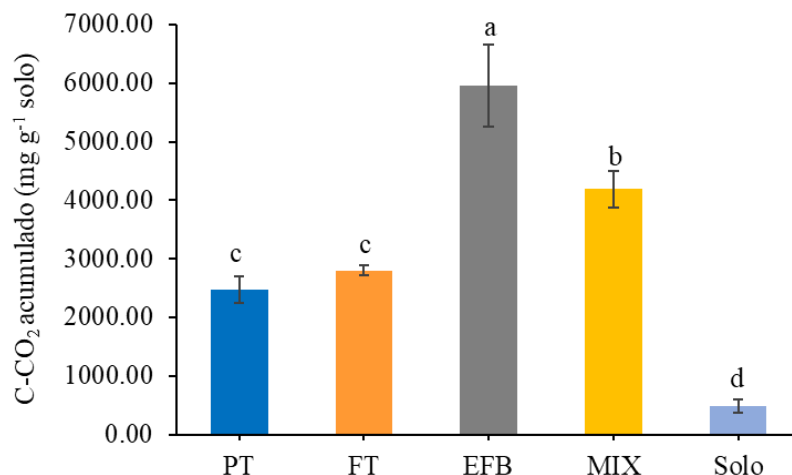
Figura 3 – Emissão de C-CO₂ durante o período de incubação de um Latossolo Amarelo com adição de resíduos de palma de óleo, pecíolo (PT), folíolo (FT), engaço (EFB), MIX – pecíolo + folíolo + engaço (MIX) e solo sem resíduo (Solo)



Na fase final de incubação, a partir de 0,16 ano, as emissões de C-CO₂ aumentaram em todos os tratamentos com adição de resíduo, sendo o EFB responsável pelo maior pico de emissão ao 0,24 ano, com emissão de 292,60 mg de C g⁻¹ de solo, muito superior ao emitido pelo solo sem resíduo no mesmo período.

As emissões de C-CO₂ acumuladas após 0,30 ano apresentaram diferenças estatísticas ($P \leq 0,05$) relacionada a adição de resíduos de palma de óleo (Figura 4). No solo com adição de EFB houve a maior emissão acumulada de C-CO₂, neste tratamento as emissões foram superiores 91,89%, comparada ao solo sem resíduo. No geral as emissões acumuladas de C-CO₂ seguiram a ordem decrescente EFB > MIX > FT = PT > solo em resíduo.

Figura 4 – Emissão de C-CO₂ acumulada após 0,30 ano de incubação de um Latossolo Amarelo com resíduos de palma de óleo, pecíolo (PT), folíolo (FT), engaço (EFB), MIX – pecíolo + folíolo + engaço (MIX) e solo sem resíduo (Solo)

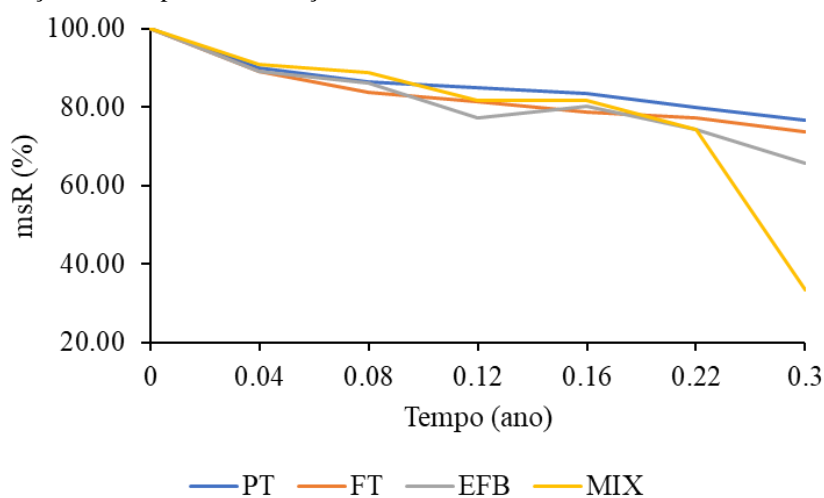


*Médias de QM seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey, a 5%

3.2 Decomposição dos resíduos

As taxas de decomposição da massa seca remanescente dos resíduos (*msR*) apresentam comportamento semelhantes de decaimento na maioria dos tempos de incubação (Figura 5), exceto para 0,12 e 0,30 ano, onde houve diferenças significativas ($P \leq 0,05$). O EFB apresentou a menor taxa de *msR* ao 0,12 ano (77,34%), isso significa maior decomposição deste resíduo, comparados aos outros. Ao 0,30 ano a decomposição mais expressiva ocorreu no MIX, o qual apresentou menor taxa de *msR* (33,47%). As taxas de decomposição de PT e FT em todos os tempos apresentaram comportamento similar.

Figura 5 – Massa seca remanescente dos resíduos (*msR*) de palma de óleo, pecíolo (PT), folíolo (FT), engaço (EFB) e MIX em função dos tempos de incubação



Para a avaliação do comportamento da decomposição dos resíduos estudados, foram ajustados modelos de decaimento exponencial. Os modelos de decaimento exponencial com três parâmetros foram utilizados para decomposição de PT e FT, e para decomposição de EFB e MIX foi mais adequado o modelo duplo (Tabela 3; Apêndice A). Os resíduos PT e FT exibiram os menores tempos de meia vida ($t_{0,5}$) comparados ao EFB e ao MIX, que apresentaram tempos de meia vida iguais, sendo mais recalcitrantes.

Tabela 3 – Equações ajustadas para a decomposição e tempos de meia-vida ($t_{0,5}$) dos resíduos de palma de óleo.

| Resíduo | Equação | R ² | $t_{0,5}$ |
|---------|--|----------------|-----------|
| | | | Anos |
| PT | $msR=76,75***+22,20***\cdot 9,30***t$ | 0,85 | 0,07 |
| FT | $msR=74,05***+25,43***\cdot 11,20***t$ | 0,95 | 0,06 |
| EFB | $msR=96,25***\cdot 1,29***t$ | 0,79 | 0,54 |
| MIX | $msR=98,09***\cdot 1,29***t$ | 0,80 | 0,54 |

onde, PT = pecíolo; FT = folíolo; EFB = engaço; MIX = mistura proporcional do pecíolo, folíolo e engaço; msR = massa seca remanescente de cada resíduo; t = tempo de meia vida em ano.

As quantidades de nutrientes mineralizadas (QM) foram influenciadas pelo tipo de resíduo de palma de óleo ($P \leq 0,05$). Os conteúdos de nutrientes remanescentes (CNR) foram obtidos através da msR e teores iniciais (0 ano) e finais (0,30 ano) dos elementos. Como não foi feita a quantificação dos nutrientes ao longo do tempo na msR , não foi possível ajustar modelos que descrevessem a cinética de liberação de nutrientes. O CNR corresponde a quantidade de cada macronutriente na msR em 0,30 ano (Tabela 4).

Tabela 4 – Conteúdo de nutrientes remanescente (CNR), média inicial (*Ci*), final (*Cf*), quantidade de nutriente mineralizada (QM) até 0,30 anos e porcentagem mineralizada (PM) de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio dos resíduos de palma de óleo.

| Resíduo | CNR | <i>Ci</i> | <i>Cf</i> | QM* | PM |
|---------|------|-----------|--------------------|--------|---------|
| | | | g kg ⁻¹ | | % |
| | | | Nitrogênio | | |
| PT | 0,97 | 2,08 | 2,46 | -0,39a | -18,45 |
| FT | 7,38 | 13,13 | 15,35 | -2,19b | -16,65 |
| EFB | 6,78 | 5,28 | 7,93 | -2,65b | -50,25 |
| MIX | 5,34 | 6,83 | 8,85 | -2,02b | -29,57 |
| | | | Fósforo | | |
| PT | 0,14 | 1,02 | 0,36 | 0,66a | 64,38 |
| FT | 0,39 | 1,30 | 0,92 | 0,38a | 29,23 |
| EFB | 0,43 | 1,21 | 0,59 | 0,62a | 51,52 |
| MIX | 0,34 | 1,18 | 0,55 | 0,63a | 53,26 |
| | | | Potássio | | |
| PT | 0,68 | 4,96 | 1,85 | 3,11d | 62,70 |
| FT | 0,68 | 21,93 | 1,46 | 20,47a | 93,34 |
| EFB | 3,64 | 10,48 | 5,03 | 5,45c | 51,97 |
| MIX | 1,59 | 12,46 | 2,62 | 9,84b | 78,97 |
| | | | Cálcio | | |
| PT | 0,78 | 7,06 | 1,74 | 5,32a | 75,40 |
| FT | 2,17 | 2,29 | 4,73 | -2,44c | -106,55 |
| EFB | 0,46 | 3,70 | 0,67 | 3,03b | 81,80 |
| MIX | 1,18 | 4,35 | 1,86 | 2,49b | 57,16 |
| | | | Magnésio | | |
| PT | 0,12 | 1,54 | 0,31 | 1,23a | 79,87 |
| FT | 0,53 | 1,26 | 1,25 | 0,01c | 1,06 |
| EFB | 0,48 | 0,78 | 0,57 | 0,21c | 27,35 |
| MIX | 0,39 | 1,19 | 0,61 | 0,59b | 47,16 |

Onde, PT, FT, EFB são os resíduos pecíolo, folíolo e engaço, respectivamente; MIX é a mistura proporcional de de pecíolo, folíolo e engaço. *Médias de QM seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey, a 5%.

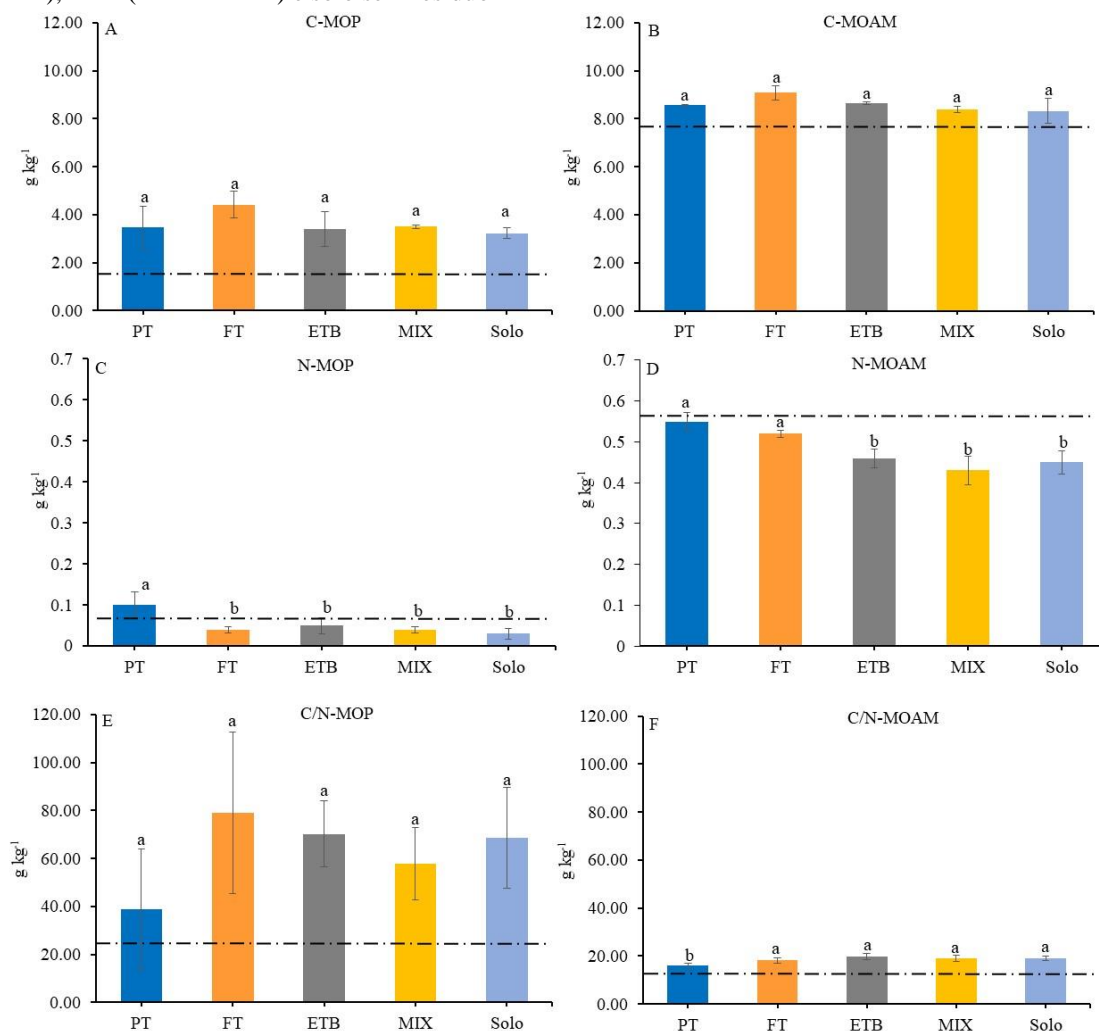
Em todos os resíduos o nitrogênio apresentou conteúdos finais maiores que os iniciais, associado a maior imobilização de N pelos microrganismos no tempo estudado. Os conteúdos finais de fósforo e potássio foram menores em todos os resíduos, mas só houve diferença significativa entre os resíduos para a QM de potássio, onde a maior QM foi no FT, superior 84,81% em relação ao PT, com menor valor de QM. A PM de potássio dos resíduos de palma de óleo decresceu na ordem FT > MIX > PT > EFB.

Os conteúdos finais de cálcio no resíduo FT foram maiores que o inicial, o que desencadeou em valores negativos de QM e PM. Os maiores valores de QM do cálcio ocorreram no PT, não havendo diferenças entre EFB e MIX, que foram inferiores ao PT 43,05% e 53,20%, respectivamente. A porcentagem mineralizada de cálcio diminuiu na ordem EFB > PT > MIX. Para o magnésio valores de QM superiores ocorreram no resíduo PT. A PM de magnésio seguiu a ordem decrescente PT > MIX > EFB > FT.

3.3 Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) e relação C/N nas frações da matéria orgânica do solo

Os resíduos de palma de óleo não influenciaram diferenças entre os tratamentos para os teores finais de C nas frações MOP e MOAM, mas houve aumentos de C ao final de 0,30 ano (Figura 6A e 6B). Os teores de N foram influenciados pelos resíduos orgânicos, assim como a relação C/N-MOAM ($P \leq 0,05$). Em ambas as frações no solo com PT houve os maiores valores de N (Figuras 6C e 6D), superiores 70% e 18,18% ao encontrado no solo sem adição de resíduo.

Figura 6 – Teor de C na fração de MOP (A) e na fração MOAM (B); teor de N na fração MOP (C) e na fração MOAM (D) do solo após 0,30 ano de incubação com resíduos de palma de óleo, pecíolo (PT), folíolo (FT), engaço (EFB), MIX (PT+FT+EFB) e solo sem resíduo



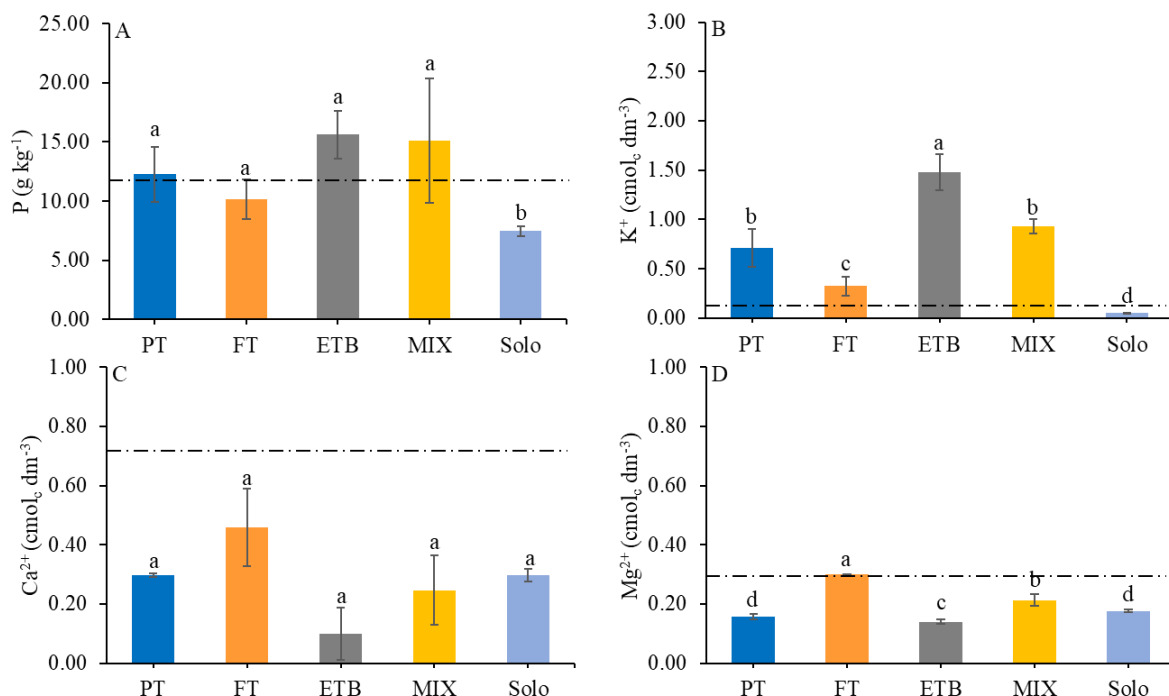
*Médias de QM seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey, a 5%. Onde, PT: pecíolo; FT: folíolo; EFB: engaço; MIX: PT+FT+EFB; e Solo: solo sem resíduo. Linha tracejada indica os teores iniciais de C, N e C/N em cada fração

Apesar de não haver diferenças significativas para a relação C/N na fração MOP (Figura 4E), o solo com adição de FT apresentou a maior média, que esteve 12,84% e 50,97% acima da relação existente no solo com adição de PT e sem resíduo, respectivamente. Para a fração MOAM, a menor relação C/N ocorreu com adição de PT, e foi inferior 18,88% ao observado no solo com adição de EFB, que foi a maior média (Figura 6F), sendo que este último não diferiu dos demais tratamentos

3.4 Teores finais de macronutrientes no solo

A adição de resíduo ao solo influenciou os teores finais de fósforo (P), potássio (K^+) e magnésio no solo (Figura 4 - $P < 0,05$). No solo com a adição de resíduos em geral os teores finais de P e K^+ no solo foram maiores que o inicial (linha tracejada). Os maiores teores de P foram encontrados nos solos com adição de EFB e MIX, sendo superiores ao solo sem resíduo cerca de 52,24% e 50,76%, respectivamente (Figura 7A). O solo com adição de EFB também apresentou os maiores teores de K^+ , com aumentos significativos de 79,38% e 96,62% em relação ao solo com adição de FT e sem resíduo, respectivamente (Figura 7B). Os teores de P e K^+ no solo após 0,30 ano de incubação apresentaram comportamento decrescente de teores na ordem $EFB > MIX > PT > FT > \text{solo sem resíduo}$.

Figura 7 – Teores finais de macronutrientes, Fósforo (A), Potássio (B), Cálcio (C) e Magnésio (D) no Latossolo Amarelo após 0,30 anos de incubação com resíduos de palma de óleo



*Médias de QM seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey, a 5%. Onde, PT: pecíolo; FT: folíolo; EFB: engaço; MIX: PT+FT+EFB; e Solo: solo sem resíduo. Linha tracejada indica os teores iniciais dos macronutrientes no solo

Os maiores teores de cálcio (Ca²⁺) foram encontrados no solo com adição de PT e FT, mesmo não havendo diferindo dos demais tratamentos (Figura 7C). Para o magnésio (Mg²⁺), no solo com adição de FT houve valores significativamente superior aos demais tratamentos (Figura 7D). O solo com adição de PT e sem resíduo apresentaram conteúdos de Mg²⁺ inferiores comparados ao solo FT cerca de 46,67% e 40,00%, respectivamente. Os conteúdos de Ca²⁺ no solo após 0,30 ano de incubação seguiu a seguinte ordem decrescente FT > PT = solo sem resíduo > MIX > EFB e para o Mg²⁺ a ordem foi FT > MIX > solo sem resíduo > PT > EFB.

4 Discussão

A composição química dos resíduos de palma de óleo influenciou a dinâmica de decomposição e disponibilidade de carbono e nutrientes importantes para os microrganismos, que atuam na mineralização dos resíduos. O aumento de emissões de C-CO₂ nos primeiros momentos da incubação com adição de resíduos de palma de óleo, seguida por uma leve diminuição e maior estabilização das emissões a partir de 0,015 ano é um comportamento, que também foi observado por Zhu et al. (2016), e foi associado a preferência dos microrganismos pela rápida mineralização inicial de compostos mais lábeis, como carboidratos e proteínas

(YUAN et al., 2014). Em todos os resíduos e no solo os teores iniciais de nitrogênio foram baixos e, como os compostos mais lábeis derivam do nitrogênio, isso implicou em rápida exaustão desses compostos mais decomponíveis, culminando no início da utilização de compostos mais recalcitrantes como lignina e cutina pelos microrganismos, evidenciado pelo leve declínio de emissões de C-CO₂ (WU et al., 2018).

A matéria orgânica e mineral é responsável pelo aporte de compostos, que são fonte de nutrientes utilizados pelos microrganismos. O consumo gradativo destes compostos pelos microrganismos desencadeia a estabilização da emissão de C-CO₂ (SHAHBAZ et al., 2019). Em nosso estudo, a alta emissão de C-CO₂ acumulada está relacionado ao aumento de colônias fúngicas observados nos solos com adição de resíduo, em especial na última fase da incubação (Apêndice B).

As características iniciais dos resíduos influenciaram o fluxo de C-CO₂ e as perdas acumuladas. Os conteúdos de nitrogênio foram baixos em todos os resíduos, principalmente no pecíolo, culminando em altas relações C/N e Lignina/N, o que explica as menores perdas acumuladas C-CO₂. Resíduos com alta relação C/N apresentam decomposição mais lenta (ASSIS et al., 2003).

O folíolo apresentou o maior conteúdo de nitrogênio e, conseqüentemente, as menores relações C/N e Lignina/N, comparado aos outros resíduos estudados. Esse comportamento possibilitou perdas de C-CO₂ superiores ao ocorrido no engajo em 0,015 ano, isso ocorreu devido ao consumo de compostos mais lábeis, derivados de N pelos microrganismos (ASSIS et al., 2003; WU et al., 2018). Em experimento de decomposição com resíduos de palma de óleo Morad et al. (2013) observaram menor relação C/N e Lignina/N de folíolos, possibilitando maior taxa de decomposição e melhor qualidade devido aos maiores conteúdos de nitrogênio.

Os fluxos de C-CO₂ e os teores iniciais de nitrogênio no solo baixos podem explicar uma possível decomposição da matéria orgânica nativa do solo, que ocorreu devido à alta relação C/N dos resíduos de palma de óleo (> 43,38), o que exigiu maior demanda de nitrogênio para a decomposição dos resíduos de palma suprida pela decomposição da matéria orgânica nativa do solo (KUZYAKOV, 2010). Esse efeito também pode explicar teores finais de N no solo abaixo dos encontrados antes da incubação.

A palma de óleo é uma Arecaceae com alta relação C/N, teores de lignina insolúvel e holocelulose em todos os resíduos, o que dificultou a decomposição e liberação de N para o solo, e pode explicar a lenta decomposição destes resíduos e a baixa qualidade, tendo em vista que os teores de nitrogênio, relação C/N e lignina/N são importantes indicadores de qualidade

de resíduos orgânicos (YAVITT e FAHEY 1986; NICOLARDOT et al., 2001). À medida que as relações C/N e lignina/N diminuem, acontece uma correlação positiva com a qualidade do resíduo. Portanto, considerando essas relações, a classificação decrescente da qualidade dos resíduos de palma de óleo foi: folíolos > EFB > MIX > pecíolos.

As perdas de massa seca dos resíduos de palma de óleo seguiu um decaimento exponencial não linear, que é explicado pela degradação de compostos facilmente decomponíveis, que se decompõem mais rápido e posterior decomposição de materiais mais recalcitrantes, como lignina e lipídios (ROSENANI et al., 1996). Assim, quanto mais compostos lábeis no resíduo mais rápido é a sua decomposição e consequentemente menor o tempo de meia vida. Compostos como açúcares solúveis, aminoácidos e ácidos orgânicos decompõem-se 20 vezes mais rápido do que a lignina (RESHI e TYUB, 2007).

Os resíduos folíolo e pecíolo tiveram o menor tempo de meia vida comparados ao engaço e MIX. O EFB foi o resíduo que apresentou as maiores quantidades de holocelulose (hemicelulose + celulose), composto vegetal de menor taxa de degradação, que exerce maior impacto nos estágios mais avançados de degradação (COBO et al., 2002; JENSEN et al., 2005), o que pode elucidar a maior decomposição de engaço e MIX ao final do período de incubação. Essa característica do EFB foi predominante para ditar a dinâmica de decomposição do MIX também, mesmo havendo adição proporcional de folíolo que tinha maior quantitativo de compostos lábeis. Rahim et al. (2023) estudando a biomassa de palma de óleo relatou que o EFB é predominantemente fibroso e constituído por altos níveis de celulose e lignina, tendo as porcentagens de lignina variando entre 14,1 e 30,45%.

A recalcitrância dos resíduos está relacionada principalmente a composição bioquímica, que atua retardando a decomposição, e possivelmente houve a necessidade da atuação de comunidades microbianas mais criteriosas, especialista em degradação de compostos mais específicos sobre estes resíduos (KALLENBACH et al., 2016; MOREIRA e SIQUEIRA, 2006). Como o experimento foi desenvolvido em condições controladas, as condições edafoclimáticas e o manejo do solo não influenciaram o processo de decomposição, que ficou restrito a composição química e bioquímica dos materiais e ação dos microrganismos. Visualmente as comunidades de microrganismos foram aumentando ao longo da incubação, em geral, com mais intensidade nos tratamentos com folíolo e MIX (Apêndice B).

A quantidade de nitrogênio mineralizada foi negativa em todos os resíduos de palma de óleo, porque não houve mineralização líquida de N devido à alta relação C/N presente nestes resíduos (TAKAKAI et al., 2020). Estudos anteriores utilizando EFB no campo, relataram

pouca mineralização de N nestes resíduos de palma de óleo, cujo a relação $C/N > 30$, induzem a imobilização líquida de N nos primeiros três meses de decomposição (LIM e ZAHARAH, 2002; CARRON et al., 2015). Em geral, resíduos de espécies leguminosas possuem relação $C/N < 13$, o que possibilita a maior mineralização líquida de nitrogênio (da SILVA et al., 2022).

É importante salientar que durante a decomposição dos resíduos de palma de óleo, os microrganismos possivelmente não encontraram N suficiente nos resíduos nas fases de decomposição de compostos mais recalcitrantes, que exigem maior disponibilidade de N para os microrganismos, e na falta do nutriente no resíduo, os microrganismos imobilizaram o N mineral do solo (TAKAKAI et al., 2020). O nitrogênio imobilizado foi utilizado para suprir a necessidade dos microrganismos em N para a biossíntese de compostos como aminoácidos e proteínas (CARDOSO, 2016). Existe correlação entre os conteúdos iniciais de N no resíduo e a mineralização de N no solo (MALUF et al., 2015). No processo de decomposição quanto mais compostos recalcitrantes no resíduo, mais N é requerido pela comunidade microbiana, fazendo com que não ocorra nitrogênio excedente, que possa ser mineralizado (PARTON et al., 2007).

Quando a disponibilidade de N no solo é baixa, a mineralização vai depender da qualidade bioquímica do resíduo e da disponibilidade de N durante a decomposição (CALDERÓN et al., 2005; MOHANTY et al., 2011; MASUNGA et al., 2016). Por isso, a utilização de resíduos de palma de óleo como cobertura e adubação orgânica deve ser associada a adubação mineral nitrogenada, que irá suprir a necessidade dos microrganismos, dificultando a imobilização de N do solo (PARTON et al., 2007), o que garantirá a disponibilidade de N para as plantas do agroecossistema (TAKAKAI et al., 2020).

Houve mineralização de P, evidenciada pelo aumento do conteúdo final de P no solo após a incubação com os resíduos de palma de óleo. O processo de mineralização de P é influenciado pela relação C/P inicial nos resíduos, que foi acima de 300 para os resíduos de palma de óleo, essa condição favorece a imobilização de P, ao passo que relações $C/P \leq 200$ favoreceriam a mineralização (MALUF et al., 2015; CARDOSO, 2016). Os compostos constituídos por P podem ser mais resistentes a decomposição microbiana, e correspondem principalmente aos fosfatos de inositol, ácidos nucleicos e fosfolipídeos (XIE et al., 2023).

O potássio é comumente relatado como o nutriente de maior liberação em resíduos vegetais (MALUF et al., 2015; da SILVA et al., 2022), como observamos também nos resíduos de palma de óleo, mais expressivamente no folíolo, onde ocorreu maior mineralização. Essa característica do potássio está relacionada ao fato deste nutriente não integrar a composição estrutural do tecido vegetal sendo encontrado na forma iônica no vacúolo, e tendo sua liberação

facilitada a partir do rompimento da membrana plasmática (MARSCHNER, 2012). A liberação de potássio dos resíduos é menos afetada pela comunidade microbiana e qualidade dos resíduos (MORADI et al., 2014).

A mineralização de cálcio em resíduos vegetais é um processo lento devido este nutriente ser um componente estrutural abundante na parede celular vegetal, que apresenta lenta decomposição (GAMA-RODRIGUES et al., 2007). E a imobilização microbiana de cálcio pode ser favorecida pelo baixo conteúdo inicial no resíduo (DINIZ et al., 2011; MALUF et al., 2015), que foi observado no folíolo onde os conteúdos finais foram maiores que os iniciais, culminando no processo de imobilização microbiana. O aumento da atividade microbiana para a degradação de compostos mais recalcitrantes pode levar a imobilização de cálcio nativo, uma vez que os microrganismos podem preferir incorporar este nutriente. Outra explicação pode estar relacionada a decomposição de lignina, onde os microrganismos especialistas produzem ácidos orgânicos, que podem complexar íons de cálcio, reduzindo a disponibilidade desse nutriente no solo e favorecendo a imobilização (FRANCHINI et al., 2001; SINSABAUGH et al., 2008; CARDOSO, 2016).

No pecíolo ocorreu a maior mineralização de magnésio, que foi o terceiro nutriente com a maior porcentagem mineralizada. O magnésio está presente livremente no vacúolo das células vegetais, e cerca de 70% pode ser facilmente liberado do resíduo, sendo os outros 30% associado a compartimentos estruturais no vegetal, que são liberados lentamente ao longo do tempo (MARSCHNER, 2012). Outros resultados foram encontrados por Moradi et al (2014), mostraram que após quatro meses de experimento cerca de 40% do Mg^{2+} inicial ainda estava presente em folhas de palma de óleo.

Ao final de 0,30 ano de incubação houve contribuições consideráveis de carbono para as frações da matéria orgânica do solo em todos os tratamentos, mesmo não havendo diferenças entre os tratamentos para os teores de carbono nas frações particulada (C-MOP) e associada a minerais (C-MOAM). A adição de folíolo propiciou aumentos de 58,43% e 14,30% nas frações C-MOP e C-MOAM, respectivamente. Estes resultados indicam o processo de mineralização da matéria orgânica e como consequência a emissão de $C-CO_2$, como já discutimos (KUZYAKOV, 2010). As maiores quantidades de carbono recuperadas na fração MOP, indicam maior grau de vulnerabilidade da matéria orgânica do solo a mudanças, ou seja, mais facilidade de perda de material lábil em função do manejo da cultura (STEWART et al., 2012). No campo, estas mudanças estão relacionadas ao revolvimento, impacto da gota da chuva, e erosão, que são intensificadas em condição de solo exposto.

Em solos com teores consideráveis de C-MOP o fluxo de carbono para o solo e a manutenção do metabolismo microbiano são contínuos. Solo com baixo quantitativo de materiais lábeis podem não conseguir suprir estas necessidades. Processos de oxidação da matéria orgânica culminam na redução do estoque de carbono no solo, desencadeando a perda da qualidade do solo (SALTON et al., 2011). Por isso, em sistemas com palma de óleo o aporte contínuo e manejo de resíduos orgânicos podem garantir o estoque de carbono no solo (RAMOS et al., 2018; COSTA et al., 2023).

Os baixos incrementos de C-MOAM nos solos incubados (< 14,30%) refletem a baixa conversão da matéria orgânica da fração mais lábil para mais humificada, que está associadas aos minerais do solo (CHAUDGHARY et al., 2014), no tempo 0,30 ano. O tempo de incubação possivelmente não foi suficiente para expressar as contribuições dos diferentes resíduos de palma no carbono das frações MOP e MOAM. A associação organo-mineral presente na fração MOAM ocorre em decorrência de compostos metabólicos dos microrganismos (exemplo os carboidratos), com estabilização preferencial e ininterrupta de polissacarídeos oriundos dos microrganismos (DUMIG et al., 2012). A fração MOAM é menos vulnerável a mudanças no solo, por estar associada as partículas mais finas, onde se encontra a matéria orgânica mais estável (GUIMARÃES et al., 2018).

O aumento de carbono no solo também ocorreu após aplicação de 30 a 60 t ha⁻¹ de EFB em condições de campo, nos experimentos de Noirot et al. (2022) e Tao et al. (2017). Nestes estudos os níveis de carbono no solo aumentaram mesmo com a mínima aplicação de EFB, o que foi explicado pelo *efeito priming* positivo (LUO et al., 2018). Mesmo o EFB apresentando entre 15 e 20% de lignina, a contínua adição deste resíduo proporcionaram *efeito priming* positivo (HAMER e MANCHER, 2005), porque o aumento deste efeito esteve em função da quantidade aplicada e não da qualidade do resíduo (SHAHBAZ et al. 2019), como explicaram os autores.

Os resíduos afetaram os conteúdos finais de nitrogênio nas frações do solo, sendo que o pecíolo aumentou 17,74% dos conteúdos de nitrogênio na MOP. Não houve aumentos de nitrogênio nos demais tratamentos, devido a imobilização de nitrogênio pelos microrganismos, que estiveram relacionadas as características químicas do resíduo e retardaram a formação de matéria orgânica do solo (TAKAKAI et al., 2020). O solo com adição de pecíolo apresentou maior teor de N-MOAM e menor C/N-MOAM, comparado aos outros resíduos, o que refletiu em menores taxas de imobilização, relacionado ao fato do nitrogênio orgânico na fração MOAM ocorrer como compostos mais recalcitrantes. A redução de nitrogênio no solo pode ser

associada às perdas de nitrogênio por volatilização na forma de NH_3 , antes da formação de NH_4^+ , em condições de solo mais alcalina (FRANCHINI et al., 2001; MALUF et al., 2015b).

A adição de resíduos de palma de óleo influenciou estatisticamente os conteúdos finais de P, K^+ e Mg^{2+} . Ao final de 0,30 ano Ca^{2+} e Mg^{2+} estiveram em menor concentração no solo comparado aos valores iniciais. As diminuições de Ca^{2+} no solo foram atribuídas em outras pesquisas a complexão por ânions orgânicos, com alta afinidade por Ca^{2+} (FRANCHINI et al., 2001), e a imobilização microbiana, que segue uma relação estequiométrica entre o carbono e os nutrientes presentes em materiais orgânicos (SINSABAUGH et al., 2008; CARDOSO, 2016).

O potássio foi o nutriente com maiores contribuições no solo devido a aplicação dos diferentes resíduos, e diminuiu no solo sem resíduo, condizendo com as maiores quantidades de potássio mineralizadas no resíduo de palma de óleo. Para o Mg^{2+} , mesmo havendo mineralização ao final do experimento, possivelmente os microrganismos consumiram parte dos teores iniciais presentes no solo em processos biológicos, e mesmo ocorrendo mineralização ao final no resíduo, não foi suficiente para suprir o solo adequadamente.

Os resíduos de folhas depositados nos plantios de palma, são constituídos de folíolos e pecíolos de folhas velhas a cada colheita, e $20 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de EFB como padrão da fazenda. Com base no padrão da fazenda para a aplicação de EFB, calculamos o conteúdo de nutrientes ao final de 0,30 ano de incubação, que podem ser disponibilizados para as plantas, sendo 158,6, 11,8, 100,6, 134, 11,4 $\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N, P, K, Ca e Mg, respectivamente. Ao comparar estes valores ao recomendado como adubação para a palma de óleo observamos que o conteúdo final de N seria adequado para o suprimento de plantios de 6 a 21 anos, o de Ca plantios acima de 25 anos, e os conteúdos de P, K e Mg plantios de até 5 anos (BRASIL et al., 2020). Esses resultados evidenciam o potencial de EFB para o fornecimento de nutrientes.

Os conteúdos iniciais de macronutrientes no EFB foram superiores aos encontrados na pesquisa de Ramos et al. (2018) com EFB utilizados para a fertilização de sistemas agroflorestais na Amazônia. Em condições de campo Carron et al. (2015) avaliou a fertilidade do solo com aplicação de EFB durante 24 meses, e observaram os melhores benefícios na camada superficial do solo, com elevação dos conteúdos de K^+ e saturação por bases a curto prazo (3 meses), e aumentos graduais de N, Ca^{2+} e Mg^{2+} ao longo do período avaliado. Possivelmente experimentos com maior tempo de incubação possibilitarão maiores quantidades de nutrientes mineralizados, pois os compostos mais recalcitrantes presentes nos resíduos de palma de óleo serão gradualmente degradados. É válido salientar que no campo a decomposição

é acelerada pelos fatores edafoclimáticos, como altas temperaturas e umidade relativa do ar em condições tropicais, o que pode refletir melhor resultados em experimentos futuros em condições de campo.

5 Conclusão

A liberação de resíduos de palma de óleo foi influenciada pelas características químicas e bioquímicas dos resíduos. Os baixos teores de nitrogênio e alta relação C/N inicial apontam a lenta disponibilidade de macronutrientes destes resíduos em curto período.

As diferenças entre resíduos não influenciaram os teores de carbono nas frações físicas da matéria orgânica, C-MOP e C-MOAM, mas o carbono nestas frações aumentara após 0,30 ano de incubação. Comportamento contrário foi observado para o N-MOP e N-MOAM. A mineralização de potássio foi mais expressiva nos resíduos de palma de óleo incubados em curto prazo, porém os conteúdos finais dos macronutrientes nos resíduos sugerem o potencial destes resíduos como fertilizantes orgânicos. Contudo, recomendamos a aplicação destes resíduos ao solo em proporções associadas com a adubação mineral, para evitar a imobilização de nutrientes importantes ao desenvolvimento da cultura em curto prazo.

REFERÊNCIAS

- ANYAOHAA, K. E.; SAKRABANIA, R.; PATCHIGOLLAB, K.; MOUAZEN, A. M. Critical evaluation of oil palm fresh fruit bunch solid wastes as soil amendments: Prospects and challenges. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 136, p. 399–409, 2018.
- ASSIS, É. P. M.; CORDEIRO, M. A. S.; PAULINO, H. B.; CARNEIRO, M. A. C. Efeito da aplicação de nitrogênio na atividade microbiana e na decomposição da palhada de sorgo em solo de cerrado sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 33, n. 2, p. 107-112, 2003.
- BOAFO, D. K.; KRAISORNPORNSON, B.; PANPHON, S.; OWUSU, B. E.; AMANIAMPONG, P. N. Effect of organic soil amendments on soil quality in oil palm production. **Applied Soil Ecology**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.09.008>
- BRASIL, E.; C.; CRAVO, M. da S.; I. de J. M. Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2020. 419 p. ISBN 978-85-7035-932-2
- BREMNER, J. M.; & MULVANEY, C. S. **Nitrogen – Total**. In A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis* (2nd ed., pp. 595–624). Madison, WI: Soil Science Society of America, 1982.
- CALDERÓN, F. J.; MCCARTY, G.W.; REEVES III, J. B. Analysis of manure and soil nitrogen mineralization during incubation. **Biol. Fertil. Soils**, v. 41, p. 328–336, 2005.

CAMBARDELLA, C. A. e ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777, 1992.

CARDOSO, E. J. B. N. **Microbiologia do solo**. 2 ed. Piracicaba: ESALQ, 2016.

CARRON, M. P.; PIERRAT, M.; SNOECK, D.; VILLENAVE, C.; RIBEYRE, F.; SUHARDI, MARICHAL, R.; CALIMAN, J. P. Temporal variability in soil quality after organic residue application in mature oil palm plantations. **Soil Research**, v. 53, p. 205–215, 2015. <https://doi.org/10.1071/SR14249>.

CHAUDHARY, D. R.; SAXENA, J.; DICK, R. P. Fate of Carbon in Water-Stable Aggregates during Decomposition of ¹³C-Labeled Corn Straw. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 45, n. 14, p. 1906-1917, 2014. <https://doi.org/10.1080/00103624.2014.909834>

COBO, J. G.; BARRIOS, E.; KASS, D. C. L.; & THOMAS, R. J. Decomposition and nutrient release by green manures in a tropical hillside agroecosystem. **Plant and Soil**, 240, 331–342, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1015720324392>

COSTA, L. R. J.; de MATOS G. S. B.; GOMES, M. F.; KATO, O. R.; CASTELLANI, D. C.; GUEDES, R. S.; VASCONCELOS, S. S. Soil fertility in oil palm agroforestry systems in the Eastern Amazon, Brazil. **Agroforest Syst**, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00832-4>

CURL, E. A.; RODRIGUEZ-KABANA, R. **Microbial interactions**. In: Wilkinson RE, editor. *Research methods in weed science*. Atlanta: Southern Weed Society; 1972. p.162-94.

Da SILVA, J. P.; SOARES, E. M. B.; TEIXEIRA, R. da S.; LIMA, A. M. N.; da SILVA, I. R. Decomposition and nutrient release from legume and non-legume residues in a tropical soil. **Eur J Soil Sci.**, v.73, p. e13151, 2022. <https://doi.org/10.1111/ejss.13151>

Da SILVA, L. I.; PEREIRA, M. C.; de CARVALHO, A. M. X.; BUTTRÓS, V. H.; PASQUAL, M.; DÓRIA, J. Phosphorus-Solubilizing Microorganisms: A Key to Sustainable Agriculture. **Agriculture**, v. 13, p. 462, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020462>

DINIZ, A. R.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A. Aporte de material decíduo e nutrientes para o solo em plantio de eucalipto e floresta secundária. **Pesq Flor Bras**, v. 31, p. 19-26, 2011.

DÜMIG, A.; HÄUSLER, W.; STEFFENS, M.; KÖGEL-KNABNER, I. Clay fractions from a soil chronosequence after glacier retreat reveal the initial evolution of organo–mineral associations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 85, n. 15, p. 1-18, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.01.046>

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

GAMA-RODRIGUES, A. C., GAMA-RODRIGUES, E. F., & BRITO, E. C. Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos culturais de plantas de cobertura em Argissolo vermelho-

amarelo na região noroeste Fluminense (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1421–1428, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600019>

GUIMARÃES, D.V.; SILVA, M. L. N.; BEINIACH, A.; BISPO, D. F. A.; CONTINS, J. G. P.; CURI, N. Relationship between soil organic matter fractions and cover plants in Olive post planting. **Revista Brasileira de Fruticultura**, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452018027>

HAMER, U., MARSCHNER, B. Priming effects in soils after combined and repeated substrate additions. **Geoderma** v. 128, p. 38–51, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.001>

HANTOKO, D.; YAN, M.; PRABOWO, B.; SUSANTO, H. Preparation of empty fruit bunch as a feedstock for gasification process by employing hydrothermal treatment. **Energy Procedia**, v. 152, p.1003–1008, 2018.

IPAM – Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia. Tudo o que você queria saber sobre fogo na Amazônia, mas não sabia para quem perguntar. Disponível em: <https://ipam.org.br/cartilhas-ipam> Acesso em: 21 nov 2023.

JENSEN, L. S., SALO, T., PALMASON, F., BRELAND, T. A., HENRIKSEN, T. M., STENBERG, B., ESALA, M. Influence of biochemical quality on C and N mineralization from a broad variety of plant materials in soil. **Plant and Soil**, 273, 307–326, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-8128-y>

JOHNSON, C. M. & ULRICH, A. **Analytical methods for use in plants analyses**. Los Angeles, CA: University of California, 1959.

KALLENBACH, C. M., FREY, S. D., & GRANDY, A. S. Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls. **Nature Communications**, 7, 13630, 2016. <https://doi.org/10.1038/ncomms13630>

KUZYAKOV, Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. **Soil Biol Biochem**, v. 42, p. 1363–71, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.04.003>

LIM KC, ZAHARAH AR. The effects oil palm empty fruit bunches on oil palm nutrition and yield and soil chemical properties. **Journal of Oil Palm Research** v. 14, p. 1–9, 2002.

LUO, Y.; LIN, Q.; DURENKAMP, M.; KUZYAKOV, Y. Does repeated biochar incorporation induce further soil priming effect. **J. Soils Sediments**, v. 18, p. 128–135, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1705-5>.

MALUF, H. J. G. M.; SOARES, E. M. B.; SILVA, I. R.; NEVES, J. C. L.; SILVA, L. O. G. Decomposição de resíduos de culturas e mineralização de nutrientes em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1681–1689, 2015a.

MALUF, H. J. G. M.; SOARES, E. M. B.; SILVA, I. R.; NEVES, J. C. N.; SILVA, M. F. O. Disponibilidade e recuperação de nutrientes de resíduos culturais em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1690–1702, 2015b.

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd.ed. New York: Academic Press; 2012.

MASUNGA, R. H.; UZOKWE, V. N.; MLAY, P. D.; SINGH, I. O. A.; BUCHAN, D.; NEVE, S. D. Nitrogen mineralization dynamics of different valuable organic amendments commonly used in agriculture. **Applied Soil Ecology**, v. 101, p. 185–193, 2016.

MOHANTY, M., REDDY, S. K., PROBERT, M. E., DALAL, R. C., RAO, S. A., MENZIES, N. W. Modelling N mineralization from green manure and farmyard manure from a laboratory incubation study. **Ecol. Model.**, v. 222, p. 719–726, 2011.

MORADI, A.; SUNG, C. T. B.; GOH, K. J.; HANIF, A. H. M.; ISHAK, C. F. Effect of four soil and water conservation practices on soil physical processes in a non-terraced oil palm plantation. **Soil & Tillage Research**, v. 145, p. e62–e71, 2014.

MOREIRA, F. M. S. & SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras-Minas Gerais, Brazil: Editora Ufla, 2006.

NICOLARDOT B.; RICOUS S.; MARY, B. Simulation of C and N mineralization during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. **Plant and Soil**, v. 228, p. 83–103, 2001.

NOIROT, L. M.; MÜLLER-STOVER, D. S.; WAHYUNINGSIH, R.; SØRENSEN, H.; SUDARNO.; SIMAMORA, A.; PUJANTO.; SUHARDI.; CALIMAN, J-P. Impacts of empty fruit bunch applications on soil organic carbon in an industrial oil palm plantation. **Journal of Environmental Management**, v. 317, p. 115373, 2022.

OLISA, Y. P.; KOTINGO, K. W. Utilization of palm empty fruit bunch (PEFB) as solid fuel for steam boiler. **European Journal of Engineering and Technology Research** n. 2, v. 2, p. 1–7, 2014.

OLSON, J. S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. **Ecology**, v. 44, n. 2, p. 322–331, 1963.

PARTON, W.; SILVER, W. L.; BURKE, I. C. et al. Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. **Science**, v. 315, n. February, p. 361–364, 2007.

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. **Soil microbiology and biochemistry**. San Diego, CA: Academic Press, 1989.

RAHIM, K. S. B. A.; SAMSURI, A. B.; JAMAL, S. H. B.; NOR, S.AB. M.; RUSLY, S.N. AB.; ARIFF, H. B.; LATIF, N. SB. A. Redefining biofuels: Investigating oil palm biomass as a promising cellulose feedstock for nitrocellulose-based propellant production. **Defence Technology**, <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.09.014>

RAMALHO FILHO, A. et al. **Zoneamento agroecológico, produção e manejo da cultura de palma de óleo na Amazônia**. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 2010. 216 p.

RAMOS, H. M. N.; VASCONCELOS, S. S.; KATO, O. R.; CASTELLANI, D. C. Above- and belowground carbon stocks of two organic, agroforestry-based oil palm production systems in eastern Amazonia. **Agrofor Syst** 92:221–237, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0131-4>

RESHI, Z.; TYUB, S. Detritus and Decomposition in Ecosystems. New Delhi, India: New Indian Publishing Agency, 2007.

ROSENANI, A. B.; BADRAN, R. D.; ZAHARAH, A. R.; ZAUYAH, S. A lysimetric study of the effect of N and P fertilizer application on decomposition and nutriente release of oil palm empty fruit bunches. **PORIM Bulletin**, 32, 1–11, 1996.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. D. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**. Brasília. v. 46, n. 10, p. 1349-1356, 2011.

SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO AGROPECUÁRIO E DA PESCA. **Pará é destaque no cenário nacional em cinco cadeias produtivas**. Disponível em: <https://www.agenciapara.com.br/noticia/40949/para-e-destaque-no-cenario-nacional-em-cinco-cadeias-produtivas>. Acesso em: 14 nov. 2023.

SHAHBAZ, M.; MENICHETTI, L.; KÄTTERER, T.; BÖRJESSON, G. Impact of long-term N fertilisation on CO₂ evolution from old and young SOM pools measured during the maize cropping season. **Sci Total Environ**, v. 25, n. 658, p.:1539-1548, 2019. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.302.

SINSABAUGH, R. L.; LAUBER, C. L.; WEINTRAUB, M. N.; AHMED B.; ALLISON, S. D.; CRENSHAW, C.; CONTOSTA, A. R.; CUSACK, D.; FREY, S.; GALLO, M. E.; GARTNER, T. B.; HOBBIE, S. E.; HOLLAND, K.; KEELER, B. L.; POWERS, J. S.; STURSOVA, M.; TAKACS-VESBACH, C.; WALDROP, M. P.; WALLENSTEIN, M. D.; ZAK, D. R.; ZEGLIN, L. H. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. **Ecol Lett.**, v. 11, p. 1252-64, 2008.

STEWART, C. E.; FOLLETT, R. F.; WALACE, J.; PRUESSNER, E. G. Impact of biosolids and Tillage on Soil Organic Matter Fraction: Implications of carbon saturation for conservation manegement in the Virginia Coastal Plain. **Soil Science Society of Ameican Journal**, v. 76, n. 4, p. 1257-1267, 2012. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0165>

TAKAKAI, F.; KOMINAMI, Y.; OHNO, S.; NAGATA, O. Effect of the long-term application of organic matter on soil carbon accumulation and GHG emissions from a rice paddy field in a cooltemperate region, Japan. -I. Comparison of rice straw and rice straw compost. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 66, n. 1, p. 84-95, 2020. DOI:10.1080/00380768.2019.1609335.

TAO, H. H.; SNADDON, J. L.; SLADE, E. M.; CALIMAN, J. P.; WIDODO, R. H.; SUHARDI; WILLIS, K. J. Long-term crop residue application maintains oil palm yield and temporal stability of production. **Agron. Sustain. Dev.** 37, 33, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0439-5>.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Oilseeds: World Markets and Trade**. Mar. 2023. Disponível em: <https://downloads.usda.library.cornell.edu> Acesso em: 10 de fev. 2024.

VIÉGAS, I. J. M. **Crescimento do dendezeiro (*Elaeis guineensis* Jacq): concentração, conteúdo e exportação de nutrientes nas diferentes partes da planta com 2 a 8 anos de idade, cultivada em Latossolo amarelo distrófico, Tailândia, Pará**. Orientador: Ronaldo Ivan Silveira. 1993. 217 f. Tese (Doutorado) ESALQ, Universidade de São Paulo, Piracicaba. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-20210104-173911/publico/ViegasIsmaelJesusMatos.pdf> Acesso em: 11 fev. 2024.

WIDER, R. K., & LANG, G. E. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. **Ecology**, v. 63, n. 6, p. 1636-1642, 1982.

WU, F.; LI, J.; CHEN, Y.; ZHANG, L.; ZHANG, Y.; WANG, S.; LIANG, J. Effects of Phosphate Solubilizing Bacteria on the Growth, Photosynthesis, and Nutrient Uptake of *Camellia oleifera* Abel. **Forests**, v. 10, p. 348, 2019.

XIE, S.; TRAN, HUU-TUAN.; PU, M.; ZHANG, T. Transformation characteristics of organic matter and phosphorus in composting processes of agricultural organic waste: Research trends. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 6, p. 331–342, 2023.

YAVITT J. B., FAHEY T. J. Litter decay and leaching from the forest floor in *Pinus contorta* (*Lodgepole pine*) ecosystems. **Journal of Ecology**, 74, 525–545, 1986.

YEOMANS, J. C. & BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:1467-1476, 1988.

YUAN, Q.; PUMP, J.; CONRAD, R. Straw application in paddy soil enhances methane production also from other carbon sources. *Biogeosciences*, v. 11, p. 237–246, 2014. <https://doi.org/10.5194/bg-11-237-2014>, 2014.

ZANUNCIO, A. J. V. E COLODETTE, J. L. Teores de lignina e ácidos urônicos na madeira e polpa celulósica de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 35, p. 341–347, 2011.

ZHU, Z.; ZENG, G.; GE, T.; HU, Y.; TONG, C.; SHIBISTOVA, O.; HE, X.; WANG, J.; GUGGENBERGER, G.; WU, J. Fate of rice shoot and root residues, rhizodeposits, and microbe-assimilated carbon in paddy soil – Part 1: Decomposition and priming effect. **Biogeosciences**, v. 13, p. 4481–4489, 2016. <https://doi.org/10.5194/bg-13-4481-2016>, 2016.

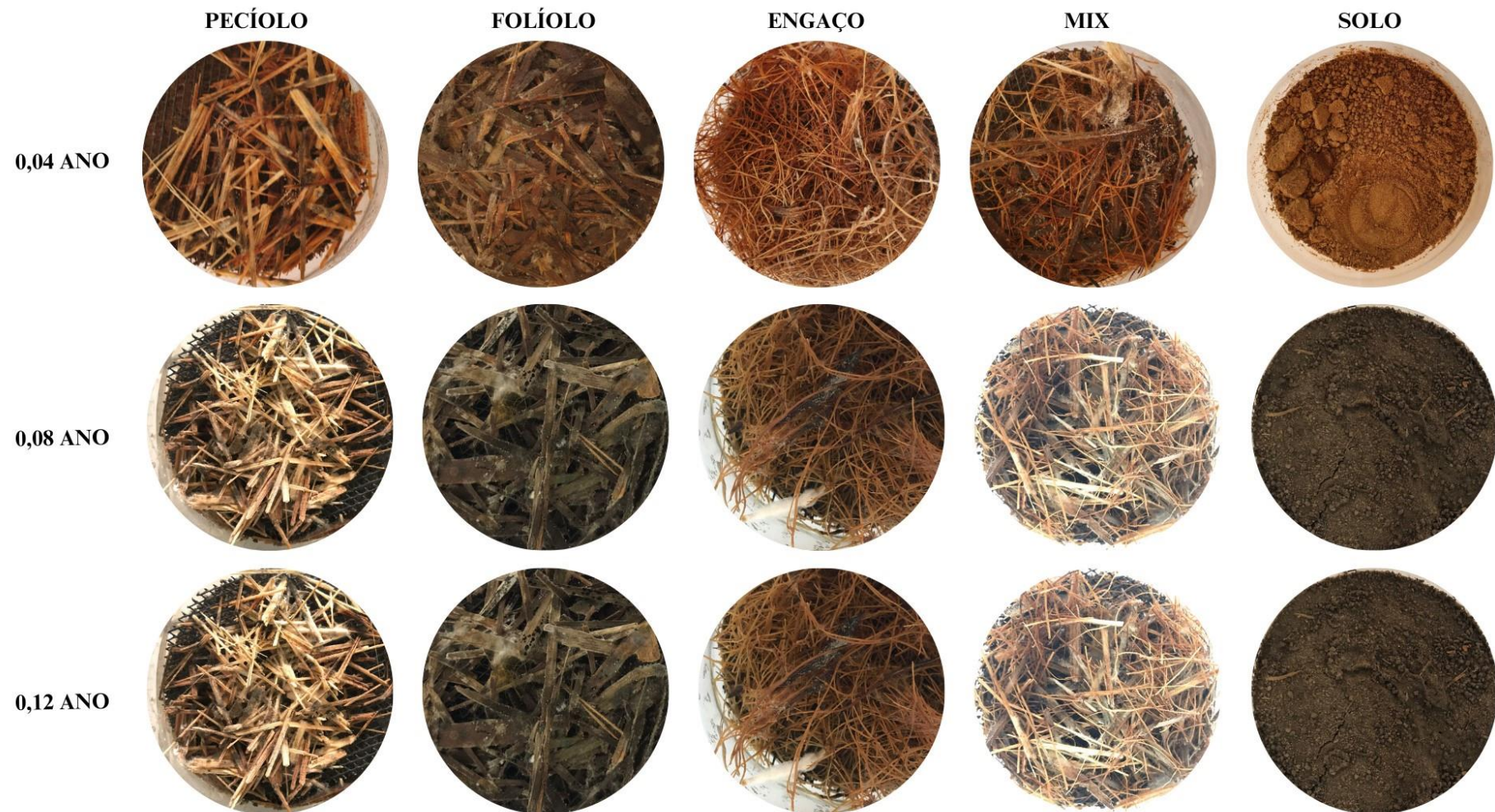
APÊNDICE

Apêndice A – Modelos de decaimento exponencial testados para ajustar a decomposição dos resíduos de palma de óleo.

| Resíduo | Parâmetros | Equação | R ² |
|---------|------------|---|----------------|
| PT | 2 | $msR=95,31 \cdot e^{-0,81t}$ | 0,78 |
| | 3 | $msR=76,75 + 22,20 \cdot e^{-9,30t}$ | 0,85 |
| | 4 | $msR=9,44 \cdot e^{-46,98t} + 90,57 \cdot e^{-0,55t}$ | 0,87 |
| FT | 2 | $msR=95,41 \cdot e^{-0,97t}$ | 0,82 |
| | 3 | $msR=74,05 + 25,43 \cdot e^{-11,20t}$ | 0,95 |
| | 4 | $msR=15,04 \cdot e^{-23,81t} + 84,98 \cdot e^{-0,47t}$ | 0,96 |
| EFB | 2 | $msR=96,25 \cdot e^{-1,29t}$ | 0,79 |
| | 3 | $msR=57,87 + 40,53 \cdot e^{-4,73t}$ | 0,80 |
| | 4 | $msR=7,68 \cdot e^{-53,85t} + 92,31 \cdot e^{-1,07t}$ | 0,81 |
| MIX | 2 | $msR=98,09 \cdot e^{-1,29t}$ | 0,80 |
| | 3 | $msR=31,62 + 66,98 \cdot e^{-2,10t}$ | 0,79 |
| | 4 | $msR=3,60 \cdot e^{-1153,04t} + 96,40 \cdot e^{-1,19t}$ | 0,79 |

Onde, PT, FT, EFB, e msR correspondem a pecíolo, folíolo, engaço e a massa seca remanescente, respectivamente; t é o tempo em anos após o período de incubação.

Apêndice B – Decomposição de resíduos de palma de óleo e presença de microrganismos nos diferentes tempos de incubação



0,16 ANO



0,22 ANO



0,30 ANO



CAPÍTULO 4 – ENGAÇO DE PALMA DE ÓLEO COMO MITIGADOR DA COMPACTAÇÃO DO SOLO

RESUMO

A produção de óleo de palma é uma atividade econômica importante na Amazônia, que gera um grande volume de resíduos, principalmente engaço (*Empty fruit bunches* - EFB), sendo seu destino uma preocupação econômica e ambiental, que se une a diminuição da qualidade dos solos em razão da compactação. Assim, o objetivo desta pesquisa foi estabelecer a pressão de pré-consolidação e índice de compressão de solos com EFB de palma de óleo em superfície. Foram realizado experimento em dois solos, arenoso e argiloso. Ensaio uniaxiais foram realizados em laboratório em esquema fatorial 2 x 5 (2 densidades de solo inicial (BDi) e 5 quantidades de EFB em superfície (0, 20, 40, 60, 80 Mg ha⁻¹), com 4 repetições. Da curva de compressão foram estimadas a pressão de pré-consolidação (σ_p), o índice de compressão (IC) e a taxa de variação da densidade dos solos (crBD). A aplicação de 40 Mg ha⁻¹ de EFB permitiu o aumento de σ_p nas duas BDi do solo arenoso. O solo argiloso foi impactado pela presença do EFB com maior BDi. O IC demonstrou que condições de baixa densidade inicial aumenta a suscetibilidade a compactação nos dois tipos de solo. A crBD, em função das pressões verticais, foi mais elevada com a aplicação de EFB no solo arenoso e diminuiu no solo argiloso. A capacidade de suporte dos solos aumentou quando estavam com EFB em superfície, demonstrando o efeito positivo deste resíduo em atenuar a compactação adicional de solos não homogeneizados.

Palavras-chave: Índice de compressão, Pressão de pré-consolidação, Resíduo orgânico.

OIL PALM EMPTIED FRUIT BUNCHES AS A SOIL COMPACTION MITIGATOR

ABSTRACT

Palm oil production is an important economic activity in the Amazon, which generates a large volume of residue, mainly emptied fruit bunches (EFB), the fate of which is an economic and environmental concern, together with the reduction in soil quality due to compaction. Thus, the aim of this research was to establish the pre-consolidation pressure and compression index of soils with oil palm emptied fruit bunches on surface. Experiments were carried out on two soils,

sandy and clay. Uniaxial tests were carried out in the laboratory in a 2 x 5 factorial design (2 initial bulk densities (BDi) x 5 amounts of EFB on the surface (0, 20, 40, 60, 80 Mg ha⁻¹)), with 4 replications. The precompression stress (σ_p), compression index (CI) were taken from the compression curve, and change in bulk density change rate (crBD) it was calculated. The application of 40 Mg ha⁻¹ of EFB led to an increase in σ_p in the two BDi of the sandy soil. The clay soil was impacted by the presence of EFB only when it was denser. The CI showed that low initial density conditions increase susceptibility to compaction in both soil types. The crBD as a function of vertical pressure was higher with the application of EFB in the sandy soil and decreased in the clay soil. The support capacity of the soils with the increased when they had EFB on the surface, demonstrating the positive effect of this residue in attenuating the additional compaction of non-homogenized soils.

Keywords: Compression index; Precompression stress; Organic residue.

1 Introdução

A produção de óleo de palma é uma atividade agroindustrial importante na economia da Amazônia, em especial do Estado do Pará, que na safra 2022/2023 foi responsável por 98,27 % da produção nacional, cerca de 2,9 milhões de toneladas (SEDAP, 2023). Essa cadeia produtiva foi intensificada a partir do Zoneamento Agroecológico da Palma de Óleo (Decreto 7172/2010), que apontou mais de 2 milhões de hectares de pastagens degradadas na Amazônia preferencial ao plantio de palma de óleo (RAMALHO FILHO et al., 2010). Desde então a produção de óleo de palma tem gerado emprego, renda e desenvolvimento dos municípios produtores. Em contrapartida há a geração de diversos resíduos, como a casca de palmiste (*Kernel*), engaço (*Empty fruit bunches - EFB*), fibras, folhas, troncos e efluente líquido - *POME* (YAN et al., 2019).

O destino dos resíduos de palma é um problema que tem gerado discussões em todos os centros produtores, incluindo Indonésia e Malásia, os maiores produtores mundial de óleo de palma (ANYAOHA et al., 2018). A cada tonelada de cachos frescos processados ocorre a produção de cerca de 20–22% de óleo de palma, 5,5–6% óleo de palmiste, 23–25% de engaço, 13–15% de fibras, 6–6,5% de casca de palmiste e 15–25% efluentes (OLISA et al., 2014; HANTOCO et al., 2018). As fibras e as cascas de palmiste são utilizadas como fonte de energia na indústria, no entanto em alguns centros a geração desses resíduos é superior a demanda energética das fábricas. A destinação de engaço é o mais preocupante, devido seu maior volume. Os depósitos de engaço frequentemente ocupam vários hectares de terras

potencialmente úteis adjacente às fábricas e o seu retorno ao campo é oneroso (RIVERA-MÉNDEZ et al., 2017).

No entanto, o engaço tem potencial como fertilizante, biocarvão, compostagem e cobertura morta, que podem trazer benefícios positivos aos solos e economia de recursos não renováveis, como fertilizantes minerais (ANYAOHA et al., 2018). A aplicação de engaço propicia proteção ao solo da erosão hídrica, reduz o impacto da chuva e o escoamento superficial, possibilitando aumento da infiltração da água no solo (CARRON et al., 2015; NOIROT et al., 2022). Em superfície o engaço também funciona como barreira de vapor contra perdas de umidade do solo e melhora a agregação, bem como aumenta o conteúdo de matéria orgânica (WRIGHT e HONS, 2005). Estudos de Mulumba e Lal (2008) mostraram que a aplicação de engaço aumentou a água disponível, porosidade total e estabilidade de agregados do solo. Entretanto, aplicações excessivas de engaço ($> 120 \text{ Mg ha}^{-1}$) podem causar condições anaeróbicas no solo, acarretando o declínio da produção de cachos, como observado em Papua Nova Guiné (REDSHAW, 2003).

A compactação das áreas produtivas, devido ao manejo mecanizado reduz a qualidade do solo. Assim, o uso de resíduos que possam atenuar os efeitos das pressões provocadas pelo tráfego agrícola é uma ação sustentável. O engaço é um resíduo fibroso, de baixa densidade (ANYAOHA et al., 2018). Essas características podem aumentar a capacidade de suporte do solo. A pressão de pré-compressão é um parâmetro importante para os modelos de compactação do solo (POODT et al., 2003), sendo uma estimativa da capacidade de suporte do solo (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1995). O índice de compressão é um parâmetro extraído da curva de compressão, utilizado para inferir sobre a susceptibilidade do solo a compactação (LARSON et al., 1980; SILVA et al., 2000). A pressão de pré-consolidação e o índice de compressão foram usados em estudos sobre compactação de solo por máquinas agrícolas (HORN et al., 2019; LIMA e KELLER, 2021), e investigações sobre o potencial de diversos resíduos agrícolas para atenuar pressões superiores à de pré-consolidação (CAVALCANTE et al., 2019; CHERUBIN et al., 2021; SUZUKI et al., 2022).

A aplicação de engaço vem sendo realizada em muitos plantios de palma de óleo como cobertura e adubação orgânica. Nesse contexto, pouco se sabe sobre o impacto do engaço nas propriedades físicas e mecânica de solos submetidos a pressões externas. Assim, sugerimos a hipótese de que quantidades crescentes de engaço em superfície aumenta a capacidade de suporte do solo de textura arenosa e argilosa, independente da densidade inicial. Os ensaios foram conduzidos em laboratório com o objetivo de estabelecer a pressão de pré-consolidação

e índice de compressão de solos com diferentes texturas após a adição com EFB de palma de óleo em superfície.

2 Material e métodos

2.1 Solo e tratamentos experimentais

Os solos utilizados no experimento apresentam texturas contrastantes, classes areia franca e muito argiloso (Tabela 1). O solo arenoso (12,16 % de argila) foi classificado como Latossolo Amarelo com caráter plântico e o solo argiloso (75 % de argila) em Latossolo Vermelho Amarelo (SANTOS et al., 2018). Aproximadamente 15 kg de terra fina seca ao ar (TFSA) foi utilizada de cada solo para a montagem dos experimentos.

Tabela 1 - Caracterização física dos solos, arenoso e argiloso, utilizados no ensaio uniaxial

| Propriedades | Solo arenoso | Solo argiloso |
|--------------------------------|--------------|----------------|
| SOC (g kg ⁻¹) | 11,02 | 16,21 |
| ρ_b (g cm ⁻³) | 1,57 | 1,05 |
| Areia (g kg ⁻¹) | 829,57 | 220,00 |
| Silte (g kg ⁻¹) | 48,82 | 30,00 |
| Argila (g kg ⁻¹) | 121,61 | 750,00 |
| Classe textural | Areia franca | Muito argilosa |

Foram coletados em indústria beneficiadora de palma de óleo o engaço (EFB), que é a biomassa residual do cacho da palma de óleo após o cozimento industrial para a retirada das amêndoas. O engaço foi levado ao laboratório, seco em estufa de circulação de ar a 60 °C, até atingir massa constante. Posteriormente esse material foi passado em triturador forrageiro e depois em moinho de facas, a fim de diminuir o tamanho e homogeneizar. Não foi suficiente a passagem no moinho de facas, devido o material ser muito fibroso (RAHIM et al., 2023), assim usamos tesoura para que o material ficasse entre 4,00 e 8,00 mm.

O estudo foi composto por dois experimentos, uma para cada textura de solo. Cada experimento foi conduzido em esquema fatorial inteiramente casualizado (2 x 5), consistindo em duas densidades do solo inicial - BDi e cinco quantidades de EFB colocado na superfície do solo, com quatro repetição. No total foram utilizados 40 anéis para realização de cada experimento.

O experimento 1 foi conduzido com o solo arenoso. As densidades iniciais deste solo foram 1,57 e 1,70 g cm⁻³, referentes a densidade média e máxima encontrada em plantios com palma de óleo (de SOUZA et al., 2023). No experimento 2, com solo argiloso as densidades iniciais de referência foram 1,20 e 1,57 g cm⁻³, a primeira corresponde a densidade média da

profundidade 0,10-0,20 m e a segunda referente a 86 % do grau de compactação. Para o solo argiloso não foi possível utilizar a densidade do solo média da profundidade 0-0,10 m como referência, pois este valor foi muito baixo ($1,03 \text{ g cm}^{-3}$), de modo que mínimas pressões causariam altas deformações, imprimindo um comportamento linear na curva de compressão. As densidades foram construídas em anéis volumétricos de $0,075 \times 0,025 \text{ m}$ de diâmetro e altura. Os dois solos foram submetidos as mesmas quantidades de EFB: 0, 20, 40, 60, 80 Mg ha^{-1} em superfície. As quantidades de EFB foram estabelecidas com base em valores adotados por produtores de palma de óleo (FURLAN JUNIOR et al., 2006).

Para a realização do teste de compressão uniaxial, as quantidades de EFB foram colocadas em saco flexível de malha de polipropileno, que tiveram sua borda costurada para garantir que todo o EFB ficasse na superfície do anel durante o ensaio (CHERUBIN et al., 2021). Os sacos com EFB não foram reaproveitados em outras amostras, assim, para os dois experimentos foram necessários 80 sacos (Figura 1).

Figura 1 – Sacos flexíveis com EFB, na superfície dos anéis, e durante o ensaio de compressão uniaxial



Fonte: A autora

2.2 Ensaio de compressão uniaxial

As amostras foram saturadas por capilaridade durante 48 h e depois equilibradas em mesa de tensão no potencial matricial 6,0 kPa. Após o equilíbrio, as amostras foram pesadas e submetidas ao ensaio de compressão uniaxial no consolidômetro pneumático, onde foram aplicadas nove pressões estáticas e sucessivas, 12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 600, 800 e 1000 kPa. As características do consolidômetro estão mais bem detalhadas em Figueiredo et al. (2011), sendo a velocidade de execução de $0,03 \text{ mm s}^{-1}$. Cada repetição foi submetida a todas as pressões. As pressões foram aplicadas ao solo por 30 segundos, conforme Mazurana et al. (2017) e testado em ensaio uniaxial por Cherubin et al. (2021). Após a aplicação de cada pressão as amostras foram descarregadas e o deslocamento vertical foi medido com um medidor digital.

Ao final do ensaio as amostras foram secas em estufa a 105 °C a fim de determinar a densidade do solo.

A taxa de variação da densidade do solo (crBD) foi calculada através da diferença entre a densidade do solo inicial e final, relacionada a aplicação de cada tensão (Equação 1):

$$\text{crBD} = \frac{(BDf - BDi)}{BDi} * 100 \quad (1)$$

onde, crBD corresponde a taxa de variação da densidade do solo (%); BDi é a densidade do solo inicial, antes da aplicação da pressão (g cm^{-3}); e BDf é a densidade do solo final, após a aplicação da pressão (g cm^{-3}).

A curva de compressão foi ajustada com base no índice de vazios usando a função SigmaP, presente no pacote *Soilphysics* no software R (SILVA e de LIMA, 2015; R CORE TEAM, 2023). A pressão de pré-consolidação (σ_p) foi determinada através do método Pacheco Silva, mediante ABNT (1990). A densidades de partículas dos solos foram determinadas pelo método do picnômetro (BLAKE e HARTAGE, 1986) e foi utilizada no cálculo do índice de vazios.

2.3 Análise estatística

Os dados de pressão de pré-consolidação, índice de compressão e densidade final de cada experimento foram submetidos aos testes de normalidade através dos testes Shapiro-Wilk a 5% de significância. Quando não normais, foram normalizados utilizando a função log. A análise de variância foi aplicada ao esquema fatorial inteiramente casualizado. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%, a fim de testar diferenças para a aplicação de EFB e BDi em cada solo de diferentes texturas. A análise de variância foi realizada utilizando o pacote ExpDes.pt no R (R CORE TEAM, 2023). A influência das quantidades de EFB na pressão de pré-consolidação foi obtida via regressão polinomial de segundo grau para cada experimento e BDi diferentes, utilizando o SigmaPlot 11.0.

3 Resultados

Os fatores quantidade de engajo (EFB) e densidade do solo inicial (BDi) influenciaram a pressão de pré-consolidação (σ_p) e índice de compressão (IC) para solos homogeneizados de diferentes texturas ($P < 0,05$). No solo arenoso, BDi $1,57 \text{ g cm}^{-3}$, a maior σ_p ocorreu quando

aplicado 40 Mg ha⁻¹ em superfície, este valor foi superior 97,2% ao controle e 26,11% a maior dose de EFB (Tabela 2). Na BDi 1,70 g cm⁻³ o solo arenoso apresentou maior σ_p com 40 Mg ha⁻¹, e não houve diferença estatística em relação a aplicação de 60 Mg ha⁻¹. Para o solo arenoso o fator BDi não influenciou estatisticamente os valores de σ_p ($P > 0,05$), mas o resíduo foi capaz de manter a pressão de pré-consolidação maior em condição de menor BDi.

Tabela 2 – Pressão de pré-consolidação (σ_p) e índice de compressão (IC) em função da aplicação de engajo (EFB) na superfície de solo arenoso e argiloso em diferentes densidades do solo iniciais.

| Solo arenoso | | | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| EFB (Mg ha ⁻¹) | σ_p (kPa) | | IC | |
| | 1,57 (g cm ⁻³) | 1,70 (g cm ⁻³) | 1,57 (g cm ⁻³) | 1,70 (g cm ⁻³) |
| 0 | 12,77cA | 87,07cA | 0,14aA | 0,14aA |
| 20 | 366,57bA | 333,92bA | 0,20aA | 0,07bB |
| 40 | 456,76aA | 540,67aA | 0,18aA | 0,14aB |
| 60 | 323,34bA | 450,81abA | 0,10aA | 0,08abA |
| 80 | 337,50bA | 336,38bA | 0,14aA | 0,10abA |
| Solo argiloso | | | | |
| EFB (Mg ha ⁻¹) | σ_p (kPa) | | IC | |
| | 1,57 (g cm ⁻³) | 1,20 (g cm ⁻³) | 1,57 (g cm ⁻³) | 1,20 (g cm ⁻³) |
| 0 | 168,80cA | 32,79aB | 0,24abB | 0,52aA |
| 20 | 286,27bcA | 42,93aB | 0,19abA | 0,28bA |
| 40 | 439,85aA | 33,95aB | 0,18bA | 0,27bA |
| 60 | 354,04abA | 35,24aB | 0,23abB | 0,32bA |
| 80 | 487,41aA | 16,81aB | 0,31aA | 0,28bA |

Letras minúsculas representam o fator A = quantidade de EFB; letras maiúsculas o fator B=densidade do solo.

No solo argiloso as maiores σ_p ocorreram quando o solo estava com BDi 1,57 g cm⁻³, onde a maior σ_p foi observada na maior dose de EFB, sendo superior ao controle 65,37%, e não diferente estatisticamente das doses 40 e 60 Mg ha⁻¹ (Tabela 2). As doses de EFB não influenciaram a σ_p no solo argiloso na menor BDi (1,20 g cm⁻³). O solo argiloso apresentou os maiores valores de σ_p associados a maior BDi ($P < 0,05$).

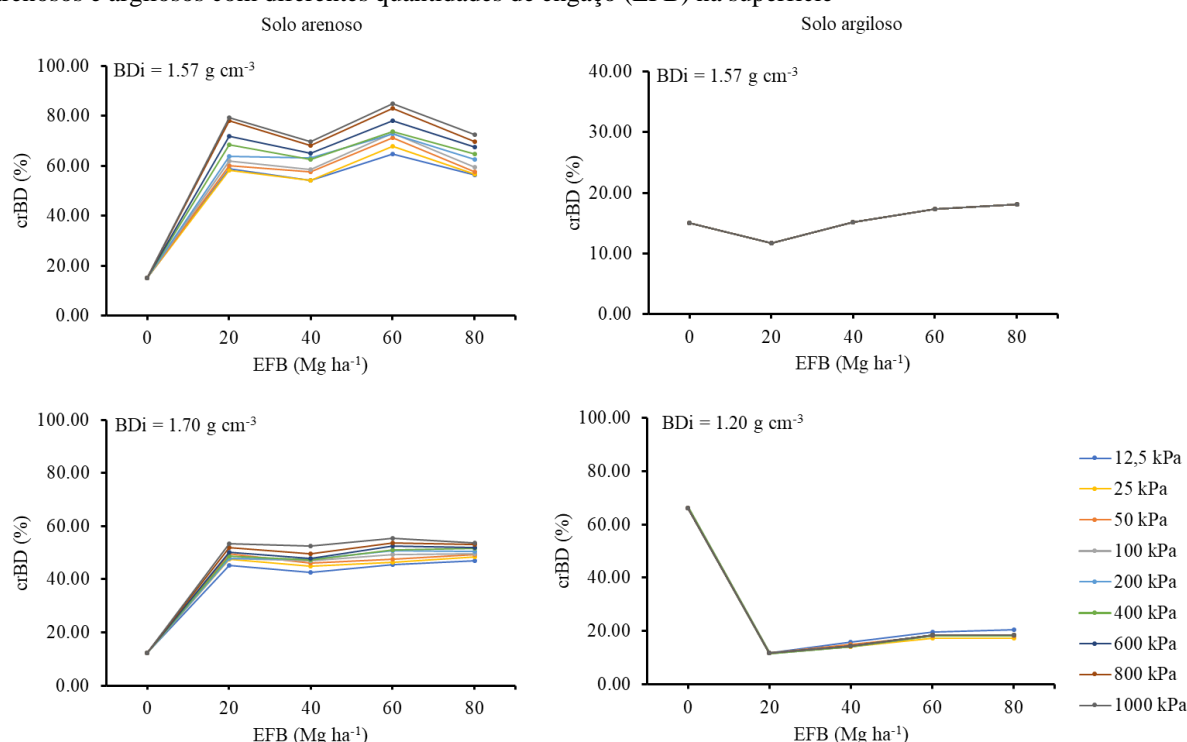
O índice de compressão não foi influenciado pelas doses de EFB em superfície no solo arenoso para a BDi 1,57 g cm⁻³ (Tabela 2). Na BDi 1,70 g cm⁻³ o IC foi influenciado pelas doses de EFB, sendo os maiores valores observados no controle e em 40 Mg ha⁻¹, que foram superiores a maior dose cerca 28,57%. As BDi no solo arenoso influenciaram o IC apenas nas doses 20 e 40 Mg ha⁻¹, sendo que os maiores IC foram observados quando o solo estava com 1,57 g cm⁻³.

No solo argiloso o IC foi influenciado pelo EFB nas duas condições de BDi ($p < 0,05$). Na BDi 1,57 g cm⁻³ o maior IC foi na dose 80 Mg ha⁻¹, sendo superior 41,94% a dose 40 Mg ha⁻¹ (Tabela 2). Com a BDi 1,20 g cm⁻³ o maior IC foi no controle, superior 47,08% e 46,15% ao encontrado nas doses 40 e 80 Mg ha⁻¹, respectivamente. As BDi apresentaram influência nos

IC do controle e 60 Mg ha⁻¹, sendo que a textura argilosa em menor BDi proporcionou os maiores IC.

A taxa de variação da densidade (crBD) do solo arenoso aumentou em resposta dos níveis de EFB e do estado inicial de compactação do solo arenoso e argiloso (Figura 2). As maiores variações crBD foram observadas a partir da aplicação de 20 Mg ha⁻¹ para todas as pressões verticais, principalmente > 200 kPa no solo arenoso nas duas densidades iniciais.

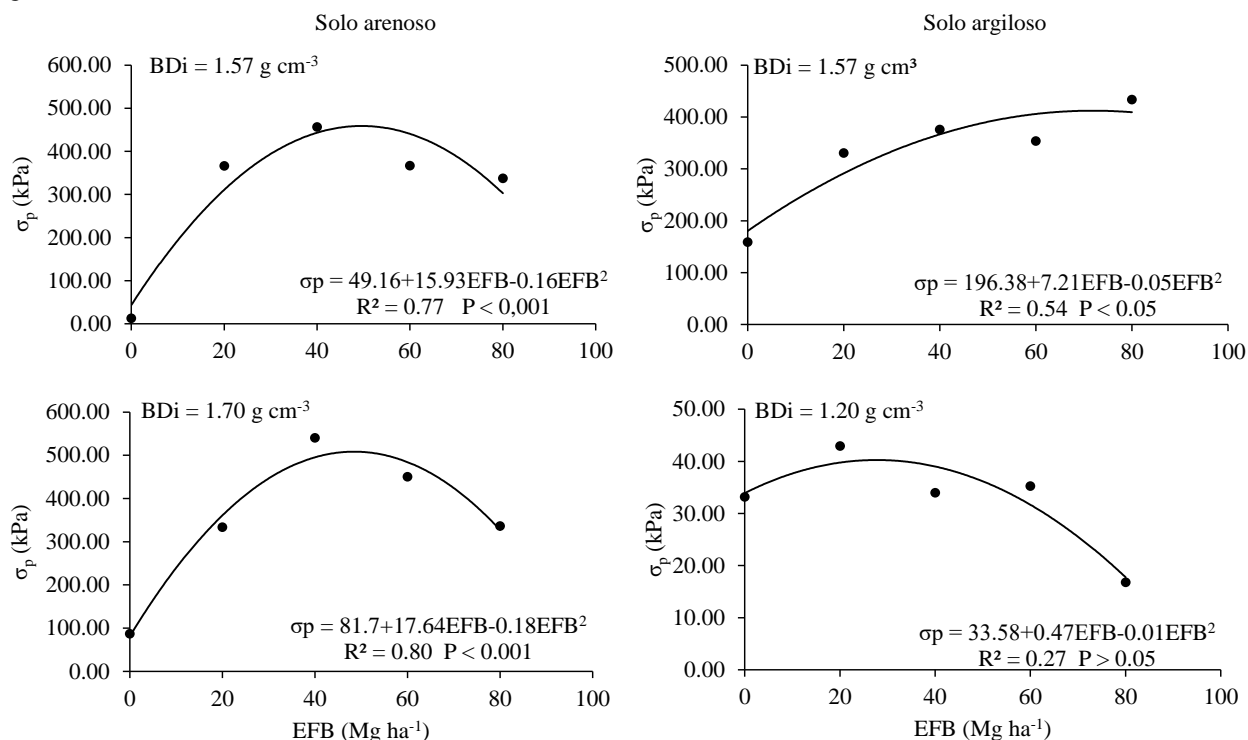
Figura 2 – Taxa de variação da densidade do solo (crBD) em resposta a aplicação de pressões verticais em solos arenosos e argilosos com diferentes quantidades de engaço (EFB) na superfície



Para o solo argiloso com a aplicação de 20 Mg ha⁻¹ de EFB houve diminuição na crBD em todas as pressões verticais experimentadas nas duas densidades iniciais (Figura 2). Nos tratamentos com BDi 1,57 g cm⁻³ a aplicação de EFB > 40 Mg ha⁻¹ conferiu aumentos na crBD inferiores a 20% em todas as pressões verticais do solo argiloso. Na BDi 1,20 g cm⁻³ houve leves incrementos na crBD, sendo a pressão 12,5 kPa responsável pelas maiores taxas em solo argiloso.

A influência do EFB na σ_p foi verificada via regressão polinomial do segundo grau (Figura 3). No solo arenoso para as duas condições de BDi a σ_p aumentou significativamente até a aplicação de 40 Mg ha⁻¹, e nas doses maiores apresentou diminuição ($P \leq 0,001$). No solo argiloso na BDi 1,57 g cm⁻³ o aumento das doses de EFB proporcionaram incrementos σ_p ($P < 0,05$). Não houve influência significativa do EFB na σ_p do solo argiloso com menor BDi.

Figura 3 – Influência da engaos de palma de óleo (EFB) na pressão de pré-consolidação (σ_p) de solos arenosos e argilosos em diferentes densidades do solo inicial (BD)



4 Discussão

Os ensaios mostraram que a aplicação de EFB em superfície de solos aumenta a pressão de pré-consolidação, em especial em solos com menor densidade inicial, pois solos com maior densidade normalmente apresentam maior estresse de compressão. A pressão de pré-consolidação é uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1995; KELLER et al., 2011). Logo, fomentar uma cobertura de dolo que aumente a pré-consolidação para valores superiores as pressões externas aplicadas por máquinas e implementos agrícolas, tornam estes solos menos passíveis de sofrer compactação adicional (MORAES et al., 2019; MENDONÇA et al., 2020).

Na maior densidade do solo houve as maiores pressões de pré-consolidação até a aplicação de 40 Mg ha⁻¹ de EFB. Houve também, modificações nas taxas de densidade do solo, em especial no solo arenoso, onde em todas as quantidades de EFB ocorreu aumento gradual da taxa de densidade em resposta ao aumento das pressões. Essas variações estiveram relacionadas com a capacidade de deformação do EFB, o que nos faz inferir sobre o papel atenuador de compactação deste resíduo. Alta variação na taxa de densidade foi observada em solo homogeneizado (25 % de argila) misturado com 12 % de palha de trigo submetido a ensaio uniaxial, devido a maior deformação da palha de trigo (SHAHGOLI e MOINFAR, 2021).

Resultados semelhantes também foram observados em estudos anteriores de avaliação do comportamento compressivo de resíduos de milho (GUPTA et al., 1987; SOANE, 1990).

A densidade inicial do solo influenciou positivamente a pressão de pré-consolidação, pois solos com baixa densidade inicial sofreram maior deformação comparado àqueles com alta densidade. Ou seja, o aumento da resistência do solo ocorre em função do aumento da densidade inicial, porque solos mais adensados já sofreram históricos de deformação no passado, estes solos possuem uma estrutura mais compacta e menos espaço vazio entre as partículas. Isso significa que as partículas individuais estão mais próximas umas das outras e, portanto, podem suportar cargas aplicadas com menos deformação (IMHOFF et al., 2004; SAFFIH-HDADI et al., 2009; AN et al., 2015).

Solos arenosos são menos suscetíveis a compactação quando submetidos a pressões externas em uma condição mais friável. Além disso, estes solos retêm menos água na superfície específica e assim apresentam maior resistência ao atrito entre partículas do solo, dificultando a movimentação das partículas para posições próximas (BRAGA et al., 2015; VAZ et al., 2005; LIMA et al., 2004).

O aumento do teor de argila acarretou menores pressão de pré-consolidação, no solo argiloso, enquanto o índice de compressão aumentou, em especial na condição de menor densidade e maior índice de vazios. Esse comportamento também foi observado por Suzuki et al. (2008) em ensaios uniaxiais aplicados em Latossolos. No entanto, quando os solos de textura diferentes estavam com a mesma densidade inicial houve maior pressão de pré-consolidação no solo argiloso, na maioria dos tratamentos com EFB, sugerindo maior capacidade de suporte de carga do solo com o aumento do teor de argila, corroborando com o estudo de Kondo e Dias Junior (1999).

O aumento da densidade do solo inicial acarretou menores índices de compressão, tanto em solo arenoso como no argiloso. O índice de compressão indica a susceptibilidade do solo a compactação, sendo determinado pela inclinação da reta de compressão virgem (LARSON et al., 1980; SILVA et al., 2000). Solos inicialmente mais adensados são menos propensos a sofrer compactação adicional comparados àqueles que apresentam menor densidade associado a menor deformação e macroporosidade do solo, culminando em solo menos compressivo (HORN et al., 2019). Suzuki et al. (2022) observaram que solos argilosos, com maior índice de vazios apresentam alto índice de compressão.

A maior quantidade de EFB em superfície do solo (80 Mg ha^{-1}) levou ao aumento da susceptibilidade a compactação do solo argiloso mais adensado, diferente do que ocorreu neste

solo com menor densidade, onde o maior índice de compressão ocorreu no controle. Isso pode estar relacionado ao aumento de material elástico na superfície de um solo que inicialmente apresentava alto índice de vazios. Ou pode ser explicado por mudanças na relação diâmetro e altura das amostras, que possivelmente provocaram variações na pressão de pré-consolidação e índice de compressão, porque as maiores doses de EFB podem ter reduzido a tensão em detrimento do aumento da altura. Lima e Keller (2021) também relatam que alteração na relação diâmetro e altura das amostras podem reduzir a tensão propagadas no ensaio uniaxial.

Em níveis mais elevados de tensão (> 200 kPa), a variação na taxa de densidade foi menor no solo mais denso (47,52% com 40 Mg ha^{-1}) em comparação com solo de menor densidade (63,10%), porque tanto a condição de menor densidade, como a elasticidade do resíduo proporcionam vazios passíveis de serem reduzidos. Resultados diferentes foram observados para o solo argiloso, onde incrementos de tensões não levaram a aumentos na taxa de densidade e a aplicação mínima de EFB diminuiu a taxa. No solo argiloso as maiores taxas de densidade estiveram no controle e não variaram com o aumento das tensões em todos os tratamentos, isso pode estar relacionado ao fato do solo ter experimentado a sua deformação máxima nas primeiras tensões, principalmente em condição de solo exposto e baixa densidade inicial (SUZUKI et al., 2022).

A melhor dose de EFB (40 Mg ha^{-1}) incrementou a pressão de pré-consolidação em 443,99 e 453,6 kPa para o solo arenoso e 271,05 kPa para o argiloso. Os nossos ensaios, com solo não estruturado se assemelham ao cenário pós preparo com revolvimento do solo para o plantio de palma de óleo. No início do ciclo da cultura o solo passa pelo rearranjo natural das partículas e adensamento que é acentuado pelas ações do tráfego agrícola ao longo do tempo (BERISSO et al., 2012; REICHERT et al., 2016), para as operações de adubação, roçagem e cambitagem. Assim, a cobertura superficial com EFB pode contribuir atenuando os efeitos das tensões verticais provocadas atividades de tráfego, por exemplo, na área de produção de palma caracterizada nesta pesquisa (Capítulo 2), onde trafegam máquinas com peso que oscila de 2432 a 6450 kg, com pressões de insuflagem nos pneus dianteiro e traseiro, 14 lb e 16 lb, respectivamente (Apêndice A). Pesquisas anteriores atestaram os benefícios de resíduos de cana-de-açúcar como atenuador da compactação adicional em campo (CAVALCANTE et al., 2019; LIMA et al., 2020).

O EFB apresenta densidade muito baixa (ANYAOHA et al., 2018), e sua composição bioquímica sugere ser um material elástico, pois apresentaram acima de 81,72 % de holocelulose e 18,55 % de lignina (Capítulo 4). Essas características além de contribuir para a

proteção do solo de pressões externas, também podem influenciar positivamente propriedades físicas, como aumento de água disponível, porosidade total, estabilidade de agregados, proteção do solo contra erosão e aumento da fertilidade (MULUMBA e LAL, 2008; CARRON et al., 2015; MORADI et al., 2014; ANYAOBA et al., 2018). Noirot et al. (2022) mostraram que a aplicação de 30 a 60 Mg ha⁻¹ anual de EFB, aumentou os teores de carbono no solo.

A condução do experimento com solo não estruturado pode ter aumentado a suscetibilidade das amostras a deformação devido ao rompimento de agregados, modificação na porosidade, e aumento de microporosos em relação aos macroporos após o peneiramento. Suzuki et al. (2022), estudaram propriedades mecânicas de solos de estruturas preservada e não preservada e observaram que solos não estruturados apresentaram maior deformação quando submetidos a cargas superiores à tensão de pré-compressão. Por isso, estudos futuros com amostras de estrutura preservadas utilizando engajo em superfície são importantes para observar se nesta condição a capacidade de suporte do solo aumentará.

5 Conclusão

As quantidades de engajo e a densidade inicial influenciaram a capacidade de suporte dos solos. Os solos argilosos com menor densidade inicial foram influenciados pela aplicação de engajo, e a maior densidade, associada a aplicação de 20 Mg ha⁻¹ propiciou maior pressão de pré-consolidação neste solo. O índice de compressão indicou que os solos menos densos são mais susceptíveis a compactação, especialmente o solo de textura argilosa, sem engajo. A aplicação de 20 Mg ha⁻¹ de engajo elevou a taxa de variação da densidade no solo arenoso e diminuiu no solo argiloso. Condições de maior densidade inicial diminuiu o impacto de pressões verticais na taxa de variação da densidade com todas as quantidades de engajo em superfície.

Nossos ensaios confirmaram o potencial hipotético do engajo para a elevação da capacidade de carga de solos. Esses resultados são prévios e mostraram respostas de solos não estruturados a pressões verticais. No campo, as pressões provocadas por máquinas agrícolas têm um comportamento triaxial, por isso ensaios futuros podem elucidar o comportamento compressivo de solos cultivados com palma de óleo em resposta a aplicação de engajo no campo.

REFERENCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 12007. **Solo: Ensaio de adensamento unidimensional**. ABNT, Rio de Janeiro, 1990.

AN, J.; ZHANG, Y.; YU, N. Quantifying the effect of soil physical properties on the compressive characteristics of two arable soils using uniaxial compression tests. **Soil Till Res.**, v. 145, p. 216–23, 2015.

ANYAOHAA, K. E.; SAKRABANIA, R.; PATCHIGOLLAB, K.; MOUAZEN, A. M. Critical evaluation of oil palm fresh fruit bunch solid wastes as soil amendments: Prospects and challenges. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 136, p. 399–409, 2018.

BERISSO, F. E.; SCHJØNNING, P.; KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; ETANA, A.; DE JONGE, L. W.; FORKMAN, J. Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. **Soil Tillage Res**, v. 122, p. 42–51, 2012. B

BLAKE, G. R.; HARTAGE, K. H. **Bulk density**. In: Klute A, editor. *Method Soil Anal Part I Phys Mineral Methods*. 2nd ed. American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison, 1986a. pp 363-375.

BLAKE, G. R.; HARTAGE, K. H. **Particle density**. In: Klute CA, editor. *Method Soil Anal Part I Phys Mineral Methods*. 2nd ed. American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison, 1986b. pp 377-382.

BRAGA, F. V. A.; REICHERT, J. M.; MENTGES, M. I.; VOGELMANN, E. S.; PADRÓN, R. A. R. Propriedades mecânicas e permeabilidade ao ar em topossequência Argissolo-Gleissolo: Variação no perfil e efeito de compressão. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 39, p. 1025–1035, 2015.

CARRON, M. P.; PIERRAT, M.; SNOECK, D.; VILLENAVE, C.; RIBEYRE, F.; SUHARDI, MARICHAL, R.; CALIMAN, J. P. Temporal variability in soil quality after organic residue application in mature oil palm plantations. **Soil Research**, v. 53, p. 205–215, 2015. <https://doi.org/10.1071/SR14249>.

CAVALCANTI, R. Q.; ROLIM, M. M.; DE LIMA, R. P.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M.; CHERUBIN, M. R. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, v. 370, p. 114–125, 2020.

CHERUBIN, M. R.; FRANCHI, M. R. A.; DE LIMA, R. P.; MORAES, M. T. de.; da LUZ, F. B. Sugarcane straw effects on soil compaction susceptibility. **Soil & Tillage Research**, v. 212, p. 105066, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105066>

CORE TEAM, R. R: A Language and Environment for Statistical Computing [internet]. R Foundation for statistical computing, Vienna, Austria. Available at: <http://www.R-project.org/> Accessed 04 dez 2023.

de SOUZA, P. R.; de LIMA, H. V.; da SILVA, G. B.; MOURA, A. dos S. Limiting Water Content for Compaction Induced by Mechanized Operations in the Soil with Oil Palm in the

Eastern Amazon. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01474-2>

DIAS JÚNIOR M.S, PIERCE F.J. A simple procedure for estimating pre-consolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, v. 8, p. 139-51, 1995

FIGUEIREDO, G. C.; da SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B.; MORAES, S. O.; de ALMEIDA, B. G. Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático: modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 35:389-402, 2011.

FURLAN JUNIOR, J. **Dendê: manejo e uso de subprodutos e dos resíduos**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2006. 40 p.

GUPTA, S.C., SCHNEIDER, E.C., LARSON, W.E., HADAS, A. Influence of corn residue on compression and compaction behavior of soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** **51**, v. 1, p. 207–212, 1987.

HANTOKO, D.; YAN, M.; PRABOWO, B.; SUSANTO, H. Preparation of empty fruit bunch as a feedstock for gasification process by employing hydrothermal treatment. **Energy Procedia**, v. 152, p.1003–1008, 2018.

HORN, R. Effect of land-use management systems on coupled hydraulic mechanical soil processes defining the climate-food-energywater nexus. **Bulg. J. Soil Sci**, v. 4, p. 3–15, 2019.
HORN, R.; Fleige, H. A method for assessing the impact offload on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil Tillage Res**, v. 73, p. 89–99, 2003.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 68, p. 17-24, 2004.

KELLER, T., LAMANDÉ, M., SCHJØNNING, P., DEXTER, A.R. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. **Geoderma**, v. 163, n. 1-2, p.13–23, 2011.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 23, p. 211-218, 1999.

LARSON, W.E., GUPTA, S.C., USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science. Society of America Journal**, v. 44, p. 450–457, 1980.

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LIMA, H.V.; LEÃO, T.P. Heterogeneidade da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pomar de laranja. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 28, 409–414, 2004.

LIMA, R. P. de.; KELLER, T. Soil stress measurement by load cell probes as influenced by probe design, probe position, and soil mechanical behaviour. **Soil & Tillage Research**, v. 205 p. 104796, 2021.

LIMA, R. P. de, ROLIM, M. M., C DANTAS, D. D., DA SILVA, A. R., MENDONÇA, E. A., Compressive properties and least limiting water range of plough layer and Plough pan in sugarcane fields. **Soil Use Manag**, 2020. <https://doi.org/10.1111/sum.12601>.

- MAZURANA, M., LEVIEN, R., ZULPO, L., PASSOS, G. M., KERPEN, H. S. Dynamic of pressure-deformation curve in uniaxial compression test in different load times. **Eng. Agrícola** 37, 973–986, 2017. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n5p973-986/2017>.
- MENDONÇA, E. A., DE LIMA, R. P., DANTAS, D. D. C., BATISTA, P. H., GIAROLA, N. F., ROLIM, M. M. Precompression stress in response to water content and bulk density under notill Oxisols in southern Brazil. **Geoderma Reg**, v. 21, p. e00261, 2020.
- MORAES, M. T., da LUZ, F. B., DEBIASI, H., FRANCHINI, J. C. Soil load support capacity increases with time without soil mobilization as a result of age-hardening phenomenon. **Soil Tillage Res**, v. 186, p. 128–134, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.009>.
- MORADI, A.; SUNG, C.T.B.; GOH, K.J.; HANIF, A.H.M.; ISHAK, C.F. Effect of four soil and water conservation practices on soil physical processes in a non-terraced oil palm plantation. **Soil & Tillage Research**, v. 145, p. e62–e71, 2014.
- MULUMBA, L. N.; LAL, R. Mulching effects on selected soil physical Properties. **Soil & Tillage Research**, v. 98, p. 106–111, 2008.
- NOIROT, L.M.; MÜLLER-STOVER, D.S.; WAHYUNINGSIH, R.; SØRENSEN, H.; SUDARNO.; SIMAMORA A.; PUJANTO.; SUHARDI.; CALIMAN, J-P. Impacts of empty fruit bunch applications on soil organic carbon in an industrial oil palm plantation. **Journal of Environmental Management**, v. 317, p. 115373, 2022.
- OLISA YP, KOTINGO KW. Utilization of palm empty fruit fruit bunch (PEFB) as solid fuel for steam boiler. **European Journal of Engineering and Technology Research** n. 2, v. 2, p. 1–7, 2014.
- POODT, M.P., KOOLEN, A.J. & VAN DER LINDEN, J.P. FEM analysis of subsoil reaction on heavy wheel loads with emphasis on soil preconsolidation stress and cohesion. **Soil and Tillage Research**, v. 73, p. 67-76, 2003.
- RAHIM, K. S. B. A.; SAMSURI, A.B.; JAMAL, S.HB.; NOR, S.AB.M.; RUSLY, S.N.AB.; ARIFF, H.B.; LATIF, N.SB.A. Redefining biofuels: Investigating oil palm biomass as a promising cellulose feedstock for nitrocellulose-based propellant production. *Defence Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.09.014>
- RAMALHO FILHO, A.; MOTTA, PEF da.; FREITAS, P. L. de.; TEIXEIRA W. G. **Agroecological zoning, production and management of oil palm culture in the Amazon**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2010. 216 p. ISBN 978-85-85864-34-7
- REDSHAW, M. **Utilization of field residues and mill by-products**. In: FAIRHURST, T.; HÄRDTER, R. (Ed.). *Oil Palm: management for large and sustainable yields*. Singapore: PPI: PPIC; Basel: IPI, 2003. p. 307-320.
- REICHERT, J.M., BRANDT, A.A., RODRIGUES, M.F., REINERT, D.J., BRAIDA, J.A. Load dissipation by corn residue on tilled soil in laboratory and field-wheeling conditions. **J. Sci. Food Agric**, v. 96, p. 2705–2714, 2016. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7389>.

RIVERA-MENDES, Y.D.; CUENCA, J.C.; ROMERO, H.M. Physiological responses of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) seedlings under different water soil conditions. **Agronomía Colombiana**, v. 34, n. 2, p. 163-171, 2016.

SAFFIH-HDADI, K.; DEFOSSEZ, P.; RICHARD, G.; CUI, Y.J.; TANG, A. M.; CHAPLAIN, V. A. Method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. **Soil Tillage Res.**, v. 105, p. 96–103, 2009.

SANTOS, H. G. dos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 Brasília: EMBRAPA, 2018, 356 p. ISBN 978-85-7035-817-2

SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO AGROPECUÁRIO E DA PESCA. **Pará é destaque no cenário nacional em cinco cadeias produtivas**. Disponível em: <https://www.agenciapara.com.br/noticia/40949/para-e-destaque-no-cenario-nacional-em-cinco-cadeias-produtivas>. Acesso em: 14 nov. 2023.

SHAHGHOLI, G.; MOINFAR, A. The effect of crop residue percentages and their chopped size On soil compactibility. **Acta Technologica Agriculturae**, v. 4, 2021.

SILVA, A. R.; de LIMA, R. P. Soilphysics: An R package to determine soil preconsolidation pressure. **Comput. Geosci.** 84, 54–60, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.08.008>.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Rev Bras Cienc Solo** v. 24, p. 239–249, 2000.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. **Soil Tillage Res**, v. 16, p. 179–201, 1990.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; SECCO, D.; FENNER, P. T.; REICHERT J. M. Soil Structure under Forest and Pasture Land-Uses Affecting Compressive Behavior and Air Permeability in a Subtropical Soil. **Soil Syst**, v. 6, p. 98. 2022, <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040098>

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. Estimativa da suscetibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 32, p. 963–973, 2008.

VAZ, C. M. P.; Freitas Iossi, M.; Mendonça Naime, J.; Macedo, Á.; Reichert, J.M.; Reinert, D.J.; Cooper, M. Validation of the Arya and Paris water retention model for Brazilian soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 69, p. 577–583, 2005

WRIGHT, A.L., HONS, F.M. Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 69, p. 141–147, 2005.

YAN, MI; HANTOKO, D.; SUSANTO, H.; ARDY, A.; WALUYO, J.; WENG, Z.; LIN, J. Hydrothermal treatment of empty fruit bunch and its pyrolysis characteristics. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00382-9>

APÊNDICE

Apêndice A – Atividades de manejo e conjunto de máquinas e implementos que trafegam nas áreas com palma de óleo em Santa Bárbara, Amazônia Oriental.

| Atividade* | Conjunto | Peso vazio (kg) | Peso carregado (kg) |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|
| Roçagem | Trator + Roçadeira | 3.205 | - |
| Adubação | Trator + adubadeira | 3.705 | 4.705 |
| Aplicação de calcário | Trator + adubadeira | 4.365 | 6.365 |
| Coroamento químico | Trato + pulverizador | 2.432 | 3.932 |
| Cambitagem | Trator + caçamba basculante | 4.050 | 6.450 |

*Todas as atividades são realizadas com tratores (marcas Valtra ou Ford) de pneu, com pressões de insuflagem nos pneus dianteiro e traseiro, 14 lb e 16 lb, respectivamente.