



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**

**RAIMUNDO LEONARDO LIMA DE OLIVEIRA**

**ATRIBUTOS FÍSICOS E CARBONO DO SOLO EM SISTEMAS**  
**AGROFLORESTAIS E MONOCULTIVO COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA**

**BELÉM/PA**

**2022**

**RAIMUNDO LEONARDO LIMA DE OLIVEIRA**

**ATRIBUTOS FÍSICOS E CARBONO DO SOLO EM SISTEMAS  
AGROFLORESTAIS E MONOCULTIVO COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA**

Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Doutor em Agronomia.

**Área de concentração:** Agronomia

**Orientador:** Dr. Steel Silva Vasconcelos

**Coorientador:** Dr. Wenceslau Geraldes Teixeira

**BELÉM/PA**

**2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia  
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- O48a Oliveira, Raimundo Leonardo Lima de  
Atributos físicos e carbono do solo em sistemas agroflorestais e monocultivo com palma de óleo na Amazônia / Raimundo Leonardo Lima de Oliveira. - 2022.  
116 f.
- Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2022.  
Orientador: Prof. Dr. Steel Silva Vasconcelos Vasconcelos  
Coorientador: Prof. Dr. Wenceslau Geraldes Teixeira.
1. Amazônia Oriental. 2. *Elaeis guineensis*. 3. Física do solo. 4. Qualidade do solo. 5. Sistema diversificado. I. Vasconcelos, Steel Silva Vasconcelos, *orient.* II. Título
-

**RAIMUNDO LEONARDO LIMA DE OLIVEIRA**

**ATRIBUTOS FÍSICOS E CARBONO DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS  
E MONOCULTIVO COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do curso de doutorado em Agronomia, área de concentração Agronomia, para obtenção do Título de Doutor.

**Aprovado em fevereiro de 2022**

**BANCA EXAMINADORA**



---

**Prof. Dr. Steel Silva Vasconcelos**  
**Orientador**  
**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA**



---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia**  
**Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB**



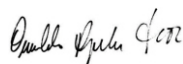
---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sueli Rodrigues**  
**Universidade Federal do Piauí - UFPI**



---

**Prof. Dr. Norberto Cornejo Noronha**  
**Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA**



---

**Prof. Dr. Osvaldo Ryohei Kato**  
**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA**

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus queridos pais Maria Lúdia de Oliveira Lima e Manoel Francisco de Lima, pelos ensinamentos, dedicação, apoio e, principalmente, pelo exemplo de vida.

**Dedico e Ofereço**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida e por sempre me iluminar na caminhada terrena.

À minha família, em especial meus pais, irmãos, avós e tios, por todo apoio, incentivo e compreensão para que pudesse alcançar meus objetivos. Meu muito obrigado!

À Universidade Federal Rural da Amazônia, pela oportunidade concedida para a realização do curso de doutorado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, por ter dado a oportunidade para realizar o curso. À Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Estado do Pará (FAPESPA), pela bolsa concedida para a realização desta pesquisa. Aos agricultores que contribuíram para realização desta pesquisa. A Cooperativa Agrícola Mista de Tomé-Açu (CAMTA), Natura Inovação e Tecnologia de Produtos-Ltda, Embrapa Amazônia Oriental (CPATU), Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal (ICRAF), e a Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional (USAID).

Ao professor Dr. Steel Silva Vasconcelos, pelos ensinamentos, dedicação, paciência e sabedoria. Meu muito obrigado!

Ao professor Dr. Wenceslau Geraldes Teixeira pelos ensinamentos, dedicação e por ter contribuído para tornar este trabalho melhor possível. Meu muito obrigado!

Aos professores do curso de doutorado (Antônio Fernandes, Gilson Matos, Mario Lopes, Sueli Rodrigues e Steel Vasconcelos), com quem tive a oportunidade de aprender um pouco mais durante as disciplinas cursadas. Meu muito obrigado!

À Neusa Ferreira, técnica do Laboratório de Análises de Sistemas Sustentáveis e o José Maria, do laboratório de Solos da Embrapa Amazônia Oriental. Obrigado, pelos ensinamentos e gentileza durante a realização das análises.

Ao Everson pela dedicação e apoio nas coletas de solo em campo. Ao Ivanildo Trindade e o Miltinho pela ajuda nas análises no laboratório. Meu muito obrigado!

Ao grupo do SAF-Dendê, em especial a todos com quem tive a oportunidade de conhecer (Alessa, Amanda, Saime, Priscila, Roberto, Andreza, Mila e Lucélia), pelo compartilhamento de conhecimentos, fundamental para o crescimento profissional. Meu muito obrigado!

A todas as pessoas que não foram citadas direta ou indiretamente, com quem tive a oportunidade de conhecer e conviver em determinados momentos do curso de doutorado. Meu muito obrigado!

## RESUMO

O dendezeiro ou palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) é cultivado tradicionalmente na Amazônia em sistemas de monocultivo. No entanto, sistemas agroflorestais (SAFs) com palma de óleo tem sido estudados e recomendados como alternativa de menor impacto ambiental ao monocultivo desta cultura. No cenário atual, de mudanças climáticas, é premente a busca por práticas de manejo e sistemas de produção, que proporcionem mais serviços ambientais, como a conservação do solo e da água. Nesse sentido, os SAFs com dendezeiro apresentam grande potencial de melhorar a qualidade física do solo e de armazenar mais carbono em agregados do que o monocultivo de dendê. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar se práticas de manejo e se os sistemas de cultivo (SAFs e monocultivo) com palma de óleo afetam a qualidade física e o carbono do solo. Realizamos o estudo em dois SAFs e um monocultivo com palma de óleo, localizados no município de Tomé-Açu, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. Coletamos amostras indeformadas e deformadas de solo nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm do solo nas zonas de manejo (coroamento da palma de óleo, caminho da colheita, pilha de folhas e faixa diversificada). No laboratório determinamos a densidade do solo, porosidade, estabilidade de agregados, curva de retenção de água e teor de carbono em macro e microagregados do solo. A resistência à penetração (RP) determinamos em campo, por meio de um penetrômetro de impacto modelo Stolf. Em geral, as zonas de manejo sem tráfego de máquinas (coroamento da palma de óleo, pilha de folhas e faixa diversificada) apresentaram maior teor de carbono e melhor qualidade física do solo nas camadas superficiais (0-5 cm e 5-10 cm) do que o caminho da colheita, que apresentou pior qualidade física do solo, ou seja, menor agregação, porosidade, retenção de água, teor de carbono e maior densidade do solo. No SAF, provavelmente o maior acúmulo de serapilheira sobre o solo influenciou em maior umidade e, conseqüentemente, menor RP do que no monocultivo. No geral, os sistemas de cultivo com palma de óleo estocam mais carbono em macroagregados do que microagregados. O SAF apresentou maior potencial de armazenar carbono em macroagregados do solo do que o monocultivo de dendê. Dependendo do conteúdo de água do solo, a RP atingiu valores críticos, o que pode limitar o crescimento de raízes. Práticas de manejo que aumentem os teores de carbono no caminho da colheita devem ser priorizadas para diminuir a degradação da qualidade física do solo nessa zona de manejo. Portanto, o cultivo de palma de óleo em SAFs apresenta grande potencial de armazenar mais carbono em agregados e de melhorar a qualidade física do solo no longo prazo do que o monocultivo de dendê.

**Palavras-chave:** Amazônia Oriental. *Elaeis guineensis*. Física do solo. Qualidade do solo. Sistema diversificado.



## ABSTRACT

Oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) is traditionally cultivated in the Amazon in monoculture systems. However, agroforestry systems (AFS) with oil palm have been studied and recommended as an alternative with less environmental impact to the monoculture of this crop. In the current scenario of climate change, the search for management practices and production systems that provide more environmental services, such as soil and water conservation, is urgent. In this sense, AFS with oil palm have great potential to improve the physical quality of the soil and store more carbon in aggregates than oil palm monoculture. Thus, the objective of this work was to evaluate if management practices and if the cultivation systems (AFS and monoculture) with oil palm affect the physical quality and carbon of the soil. We carried out the study in two AFS and one oil palm monoculture, located in the municipality of Tomé-Açu, state of Pará, Eastern Amazon, Brazil. We collected undisturbed and deformed soil samples in the 0-5, 5-10, 10-20 and 20-30 cm soil layers in the management zones (weeded circle, harvest path, leaf pile, and diversified strip). In the laboratory we determined the soil density, porosity, aggregate stability, water retention curve and carbon content in soil macro and microaggregates. The penetration resistance (PR) was determined in the field, using a Stolf model impact penetrometer. In general, the management zones without machine traffic (weeded circle, leaf pile, and diversified strip) had higher carbon content and better physical soil quality in the superficial layers (0-5 cm and 5-10 cm) than the harvest path, which presented worse physical soil quality, ie, lower aggregation, porosity, water retention, carbon content and higher soil density. In the SAF, probably the greater accumulation of litter on the soil influenced in higher humidity and, consequently, lower PR than in the monoculture. Overall, oil palm cropping systems store more carbon in macroaggregates than microaggregates. AFS showed greater potential to store carbon in soil macroaggregates than oil palm monoculture. Depending on the water content of the soil, the PR reached critical values, which can limit root growth. Management practices that increase carbon levels on the way to harvest should be prioritized to reduce the degradation of physical soil quality in this management zone. Therefore, oil palm cultivation in AFS has great potential to store more carbon in aggregates and improve the physical quality of the soil in the long term than oil palm monoculture.

**Keywords:** Eastern Amazon. *Elaeis guineensis*. Diversified system. Soil physics. Soil quality.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - CONTEXTUALIZAÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo geral .....	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO 2 - MANAGEMENT PRACTICES AFFECT SOIL CARBON AND PHYSICAL QUALITY IN OIL PALM AGROFORESTRY SYSTEMS IN THE AMAZON.....</b>	<b>21</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>21</b>
2.1 Introduction .....	21
2.2 Materials and Methods .....	24
2.2.1 Study site .....	24
2.2.2 Soil collection .....	25
2.2.3 Analysis of soil samples .....	25
2.2.4 Soil volumetric water content and fitting of water retention curve.....	26
2.2.5 Weighted average aggregate diameter (AGGRE) and soil density (SOILD) .....	27
2.2.6 Soil microporosity (MICPO), total porosity (TOTPO), macroporosity (MAPCO), and available water (AVAIL).....	28
2.2.7 Penetration resistance (PENET).....	29
2.2.8 Soil compaction degree (COMPA) and structural stability index (STRUC) .....	29
2.2.9 Statistical analysis .....	30
2.3 Results.....	30
2.4 Discussion .....	31
2.5 Conclusion.....	34
References.....	36
<b>CAPÍTULO 3 - SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE ÓLEO MELHORAM A QUALIDADE FÍSICA E ESTOCAM MAIS CARBONO EM AGREGADOS DO SOLO DO QUE MONOCULTIVO NA AMAZÔNIA .....</b>	<b>56</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>56</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>56</b>
3.1 Introdução.....	57
3.2 Material e Métodos .....	59
3.2.1 Áreas de estudo .....	59
3.2.2 Coleta de solo .....	60
3.2.3 Estabilidade de agregados do solo em água.....	61
3.2.4 Diâmetro médio ponderado dos agregados (AGGRE), densidade do solo (SOILD) e porosidade total do solo (TOTPO) .....	61
3.2.5 Resistência à penetração (PENET) e umidade gravimétrica do solo (MOIST).....	62
3.2.6 Estoque de carbono do solo .....	63
3.2.7 Biomassa de raízes .....	63
3.2.8 Análise estatística .....	63
3.3 Resultados .....	64
3.3.1 Atributos físicos e estoque de raízes do solo .....	64
3.3.2 Estoque de carbono nas frações de agregados do solo .....	64
3.3.3 Correlação entre variáveis do solo .....	64
3.4 Discussão .....	65

3.4.1 Atributos físicos do solo .....	65
3.4.2 Estoque de carbono em frações de agregados do solo.....	67
3.5 Conclusões.....	70
REFERÊNCIAS .....	71

<b>CAPÍTULO 4 - RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM SISTEMA AGROFLORESTAL COM DENDEZEIRO NA AMAZÔNIA .....</b>	<b>90</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>90</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>90</b>
<b>4.1 Introdução .....</b>	<b>91</b>
<b>4.2 Material e Métodos .....</b>	<b>92</b>
<b>4.2.1 Área de estudo .....</b>	<b>92</b>
<b>4.2.2 Coleta de solo .....</b>	<b>93</b>
<b>4.2.3 Análises das amostras de solo .....</b>	<b>94</b>
<b>4.2.4 Determinação da densidade, porosidade total e umidade volumétrica do solo .....</b>	<b>94</b>
<b>4.2.5 Determinação da precipitação e evapotranspiração potencial (ET<sub>o</sub>).....</b>	<b>95</b>
<b>4.2.6 Determinação da resistência do solo à penetração (RP) .....</b>	<b>95</b>
<b>4.2.7 Ajuste da RP em função da umidade e densidade do solo .....</b>	<b>96</b>
<b>4.2.8 Simulação da umidade volumétrica no Hydrus-1D .....</b>	<b>96</b>
<b>4.2.9 Análise estatística .....</b>	<b>97</b>
<b>4.3 Resultados .....</b>	<b>97</b>
<b>4.4 Discussão .....</b>	<b>98</b>
<b>4.5 Conclusões.....</b>	<b>99</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>100</b>

## CAPÍTULO 1 - CONTEXTUALIZAÇÃO

O dendzeiro ou palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) é uma palmeira originária dos trópicos de planície úmida da África Ocidental (SEDAP, 2022; WOITTIEZ et al., 2017). É cultivada principalmente nos países do sudeste asiático e é considerada a oleaginosa de maior produtividade mundial (HANSEN et al., 2015; SEDAP, 2022), com rendimento médio de 20 a 22 toneladas de cacho de fruto fresco (CFF) por hectare/ano e produtividade entre 4 e 5 toneladas de óleo/ha (SEDAP, 2022). Nas últimas décadas ocorreu um aumento das plantações comerciais dessa *commodity* agrícola no continente Asiático, que lidera mais de 80% da produção mundial de óleo de palma e também houve uma expansão do cultivo de palma de óleo, nos países da África e América Latina (HANSEN et al., 2015).

No Brasil, que está na nona colocação no *ranking* mundial de países produtores de óleo de palma, o estado do Pará é o maior produtor nacional com produção anual de 3,200.000 t/CFF, área plantada de 231.669 ha e área colhida de 200.000 ha, sendo 40 mil hectares em áreas de agricultores familiares (SEDAP, 2022). O cultivo da palma de óleo ocorre principalmente nos municípios paraenses de Acará, Moju, Tailândia e Tomé-Açu, denominados como polo do dendê, localizados na região nordeste do Estado do Pará (SEDAP, 2022).

O cultivo da palma de óleo na região nordeste do estado do Pará acontece na grande maioria em sistemas convencionais (monocultivos) que se caracterizam pelo uso elevado de insumos químicos e maquinários (KATO et al., 2011). Na Amazônia, os pequenos agricultores, no geral, possuem dificuldades de acesso a crédito e insumos e, por isso, devem buscar sistemas alternativos e viáveis economicamente aos agricultores amazônidas (KATO et al., 2011). Nesse contexto, a adoção de sistemas de uso da terra mais sustentáveis como os sistemas agroflorestais (SAFs) constitui uma alternativa viável de produção para esses agricultores (CHERUBIN ET al., 2019; KATO et al., 2011). A palma de óleo cultivada em SAFs tem contribuído para uma maior prestação de serviços ambientais, através da melhoria da qualidade do solo, por meio do maior estoque de carbono no solo, quando comparado a sistemas de monocultivo adotados para essa cultura (GOMES et al., 2021).

Esse maior estoque de carbono em SAFs com palma de óleo geralmente estão associados ao aporte constante de serapilheira sobre o solo, maior diversidade de espécies e de sistemas radiculares, além do manejo da adubação orgânica realizado nesses sistemas de produção. Por exemplo, nos SAFs em geral, a predominância de macroagregados contribui na melhoria da qualidade física do solo, além de armazenar mais carbono do que os microagregados

(CHATTERJEE et al., 2020; CHEN et al., 2017). Portanto, os SAFs apresentam grande potencial de promover melhorias na qualidade do solo.

A adoção de sistemas de uso da terra que promovam maior conservação dos recursos naturais, em especial o solo e a água, torna-se imprescindível diante do cenário de degradação de terras e mudanças climáticas (STEFANOSKI et al., 2013). Os SAFs podem garantir maior proteção dos solos e ajudar na recuperação de áreas degradadas na Amazônia (MASCARENHAS et al., 2017). Dependendo da diversidade de espécies presentes nos SAFs e das práticas de manejo realizadas, podemos ter impactos distintos na manutenção e melhoria das propriedades físicas e funções do solo (MASCARENHAS et al., 2017; STÖCKER et al., 2020). De acordo com o manejo adotado, o solo pode sofrer alterações desfavoráveis nos seus componentes físicos, no desenvolvimento radicular e armazenamento de água (MACHADO et al., 2008; MORADI et al., 2015).

O sistema de produção da palma de óleo apresenta distinta variabilidade espacial de atributos do solo, determinada pelo manejo (NELSON et al., 2014; 2015). O manejo do empilhamento das folhas, por exemplo, proporciona distinta variação espacial no teor de carbono (CARVALHO et al., 2014; FRAZÃO et al., 2013; RAMOS et al., 2018). O uso de máquinas para colheita dos frutos afeta a qualidade do solo, com impactos sobre os atributos físicos do solo (FERREIRA et al., 2019; SATO et al., 2017; ZURAI DAH, 2019).

As propriedades físicas e hídricas do solo incluem textura, densidade, agregação, porosidade, distribuição de poros, resistência à penetração, curva de retenção de água no solo, grau de saturação do solo, condutividade hidráulica e infiltração. Essas propriedades são importantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas (MORAES et al., 2016). O aporte de matéria orgânica exerce papel fundamental no comportamento físico e hídricos dos solos, atuando em muitas propriedades deste (LIER, 2010). O manejo que favorece maior cobertura morta sobre o solo, tende a aumentar a disponibilidade de matéria orgânica, influenciando numa maior estabilidade de agregados, porosidade, infiltração e retenção de água e menor densidade do solo (MOITINHO et al., 2020; AZIZSOLTANI et al., 2019; DLAPA et al., 2020). No geral, as áreas de florestas, pela presença constante da matéria orgânica e grande variedade de arquiteturas e dimensões de sistemas radiculares, apresentam as melhores condições físico-hídricas para uma boa agregação, maior intensidade de poros grandes, maior condutividade hidráulica e melhor retenção hídrica (MARQUES et al., 2010).

A qualidade do solo pode ser avaliada por meio de várias propriedades químicas (BEHERA et al., 2020; RÜEGG et al., 2019), físicas (SOARES et al., 2021; STÖCKER et al., 2020) e biológicas (HARON et al., 1998; SILVA JÚNIOR et al., 2018). Por exemplo, a

resistência do solo à penetração (RP) é considerada uma importante propriedade física para avaliar a qualidade dos solos em sistemas cultivados, por ter a função principalmente de caracterizar o estado de compactação dos solos (MORAES et al., 2014; SILVEIRA et al., 2010). No geral, a partir de 2 ou 3 MPa a RP pode restringir o crescimento e o desenvolvimento das plantas (KAISER et al., 2009; MORAES et al., 2014; ROQUE et al., 2003). A RP pode ser influenciada por diversos fatores do solo: densidade, textura, teor de matéria orgânica e o conteúdo de água (VAZ et al., 2011).

A relação entre umidade do solo e RP tem sido objeto de estudos realizados por vários autores (BUSSCHER et al., 1997; GABRIEL et al., 2021; SILVEIRA et al., 2010; VAZ et al., 2011). Os estudos sobre RP e umidade do solo conduzidos por Busscher et al. (1997) e Silveira et al. (2010), testaram diferentes modelos matemáticos e concluíram que as funções exponenciais e potência são as que melhor descrevem a relação entre umidade do solo e RP. A variação temporal e espacial da RP é dependente principalmente das mudanças do conteúdo de água no solo (DUARTE et al., 2019; SILVA; BIANCHINI; CUNHA, 2016). A RP diminui exponencialmente com o aumento da umidade do solo (GABRIEL et al., 2021; MORAES et al., 2012; VAZ et al., 2011).

O estudo de Yahya et al. (2013) mostrou que a compactação do solo afetou o crescimento de raízes da palma de óleo, resultando numa menor produção e crescimento de raízes primárias e secundárias, que foi compensada pela produção de raízes terciárias e quaternárias. Em monocultivo de palma de óleo, Sato et al. (2017) observaram que, na camada 0-20 cm, a densidade do solo e a RP na zona do tráfego de máquinas (caminho da colheita) foram maiores do que na linha de plantio. Estes autores relataram, que na zona do tráfego de máquinas, principalmente nos períodos de menor umidade do solo, a RP atingiu valores críticos, que podem restringir o crescimento de raízes.

Portanto, é importante conhecer os impactos das práticas de manejo e de sistemas de cultivo de palma de óleo (sistema agroflorestal e monocultivo), sobre a qualidade do solo, com foco nos atributos físicos e carbono do solo. Os estudos realizados em cultivos de palma de óleo são restritos a monocultivos e exploraram, por exemplo, grau de compactação do solo, intervalo hídrico ótimo, densidade, porosidade, atributos químicos e biológicos, mas em sistemas de produção de palma de óleo, baseados no monocultivo (BEHERA et al., 2020; FERREIRA et al., 2019; HARON et al., 1998; SATO et al., 2017; ZURAI DAH, 2019). No entanto, estudos sobre os atributos físicos e carbono do solo em SAFs com palma de óleo não têm sido relatado na Amazônia. Assim, surgiu a necessidade de realizar este estudo, para conhecermos: quais os

impactos do manejo do solo e de sistemas agroflorestais e monocultivo com palma de óleo sobre os atributos físicos e carbono do solo?

Portanto, o estudo sobre atributos físicos e carbono do solo é importante para conhecermos os impactos do manejo e de sistemas de cultivo com palma de óleo, sobre a qualidade do solo. Este estudo, além de caracterizar os atributos físicos e o carbono do solo em Latossolo Amarelo sob palma de óleo em SAFs e monocultivo, poderá também auxiliar futuramente em práticas de manejo mais sustentáveis, que causem menores impactos ambientais sobre as propriedades e funções do solo na Amazônia Oriental.

Assim, dividimos esta tese em quatro capítulos, sendo o capítulo 1 a contextualização do tema e os outros três capítulos correspondem aos artigos científicos gerados por meio desta pesquisa. No Capítulo 2 abordamos a influência das práticas de manejo sobre o carbono e a qualidade física do solo; o Capítulo 3 comparamos o impacto dos sistemas de cultivo com palma de óleo sobre a qualidade física e o estoque de carbono em agregados do solo; e o Capítulo 4, abordamos a estimativa da resistência à penetração em função da umidade volumétrica do solo.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Avaliar se as práticas de manejo e se os sistemas de cultivo (sistema agroflorestal e monocultivo) com palma de óleo afetam a qualidade física e o carbono do solo.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Avaliar se a qualidade física do solo varia entre as zonas de manejo (coroamento da palma de óleo, caminho da colheita, pilha de folha e faixa diversificada), em sistemas agroflorestais com palma de óleo.

Avaliar se o estoque de carbono em macro e microagregados do solo é maior em sistemas agroflorestais com palma de óleo em comparação ao monocultivo.

Caracterizar a resistência do solo à penetração em função da umidade volumétrica nas zonas de manejo de um sistema agroflorestal com palma de óleo.

## REFERÊNCIAS

- AZIZSOLTANI, E. et al. How Soil Pore Distribution Could Help in Soil Quality Studies as an Appropriate Indicator. **Eurasian Soil Science**, v. 52, n. 6, p. 654-660, 2019.
- BEHERA, S. K. et al. Oil palm cultivation enhances soil pH, electrical conductivity, concentrations of exchangeable calcium, magnesium, and available sulfur and soil organic carbon content. **Land Degradation and Development**, v. 31, n. 18, p. 2789-2803, 2020.
- BUSSCHER, W. J. et al. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil and Tillage Research**, v. 43, n. 3-4, p. 205-217, 1997.
- CARVALHO, W. R. et al. Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm-based agroforestry systems in the eastern Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 88, n. 2, p. 357-368, 2014.
- CHATTERJEE, N. et al. Depth-wise distribution of soil-carbon stock in aggregate-sized fractions under shaded-perennial agroforestry systems in the Western Ghats of Karnataka, India. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 2, p. 341-358, 2020.
- CHEN, C. et al. Effects of rubber-based agroforestry systems on soil aggregation and associated soil organic carbon: Implications for land use. **Geoderma**, v. 299, p. 13-24, 2017.
- CHERUBIN, M. R. et al. Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 5, p. 1741-1753, 2019.
- DLAPA, P. et al. The Impact of Land-Use on the Hierarchical Pore Size Distribution and Water Retention Properties in Loamy Soils. **Water**, v. 12, n. 2, p. 339, 2020.
- DUARTE, M. L. et al. Avaliação da variabilidade espacial da resistência a penetração e teor de água de um solo de Terra Preta Arqueológica. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 4, n. 3, p. 200-208, 2019.



FERREIRA, R. L. C. et al. Tráfego de máquinas agrícolas em cultivo de palma de óleo: implicações na qualidade física do solo. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 62, 2019.

FRAZÃO, L. A. et al. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. **Gcb Bioenergy**, v. 5, n. 4, p. 384-390, 2013.

GABRIEL, J. L. et al. Cover crops reduce soil resistance to penetration by preserving soil surface water content. **Geoderma**, v. 386, p. 1-8, 2021.

GOMES, M. F. et al. Oil palm agroforestry shows higher soil permanganate oxidizable carbon than monoculture plantations in Eastern Amazonia. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 15, p. 4313-4326, 2021.

HANSEN, S. B. et al. Trends in global palm oil sustainability research. **Journal of cleaner Production**, v. 100, n.1, p. 140-149, 2015.

HARON, K. et al. Microbial biomass and soil organic matter dynamics in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantations, West Malaysia. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 30, n. 5, p. 547-552, 1998.

KAISER, D. R. et al. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 845-855, 2009.

KATO, O. R. et al. Projeto dendê em sistemas agroflorestais na agricultura familiar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS, 8, 2011, Belém. Anais... SBSAF: Embrapa Amazônia Oriental: UFRA: CEPLAC: EMATER: ICRAF, 2011. CD-ROM.

LIER, Q. J. V. **Física do Solo**. 1. Ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 298 p.

MACHADO, J. L. et al. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 495-502, 2008.

MARQUESI, J. D. O. et al. Atributos químicos, físico-hídricos e mineralogia da fração argila em solos do Baixo Amazonas: Serra de Parintins. **Acta Amazônica**, v. 40, n. 1, p. 01-12, 2010.

MASCARENHAS, A. R. P. et al. Atributos físicos e estoques de carbono do solo sob diferentes usos da terra em Rondônia, Amazônia Sul-Occidental. **Pesquisa florestal brasileira**, v. 37, n. 89, p. 19-27, 2017.

MORADI, A. et al. Effect of four soil and water conservation practices on soil physical processes in a non-terraced oil palm plantation. **Soil and Tillage Research**, v. 145, p. 62-71, 2015.

MOITINHO, M. R. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and soil aggregation in a no-tillage system with crop rotation. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 183, n. 4, p. 482-491, 2020.

MORAES, M. T. et al. Benefícios das plantas de cobertura sobre as propriedades físicas do solo. **Práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água**, 2016.

MORAES, M. T. et al. Correction of resistance to penetration by pedofunctions and a reference soil water content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1704-1713, 2012.

MORAES, M. T. et al. Use of penetrometers in agriculture: a review. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 1, p. 179-193, 2014.

NELSON, P. N. et al. Methods to account for tree-scale variability in soil-and plant-related parameters in oil palm plantations. **Plant and Soil**, v. 374, n. 1, p. 459-471, 2014.

NELSON, P. N. et al. Soil sampling in oil palm plantations: a practical design that accounts for lateral variability at the tree scale. **Plant and Soil**, v. 394, n. 1, p. 421-429, 2015.

RAMOS, H. M. N. et al. Above-and belowground carbon stocks of two organic, agroforestry-based oil palm production systems in eastern Amazonia. **Agroforestry systems**, v. 92, n. 2, p. 221-237, 2018.

ROQUE, C. G. et al. Comparação de dois penetrômetros na avaliação da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob diferentes usos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 25, n. 1, p. 53-57, 2003.

RÜEGG, J. et al. Drivers of soil carbon stabilization in oil palm plantations. **Land Degradation & Development**, v. 30, n. 16, p. 1904-1915, 2019.

SATO, M. K. et al. Least limiting water range for oil palm production in Amazon region, Brazil. **Scientia Agricola**, v. 74, n. 2, p. 148-156, 2017.

SEDAP, 2022. **Secretária de Estado de Desenvolvimento Agropecuário e da Pesca**. Disponível: <<http://www.sedap.pa.gov.br/content/dend%C3%AA>>. Acesso em: 02 de fev. 2022.

SILVA JUNIOR, A. C. et al. Seasonal variation of soil attributes in oil palm plantations in the Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 2, p. 1-8, 2018.

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

SILVEIRA, D. C. et al. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 34, n. 3, p. 659-667, 2010.

SOARES, M. B. et al. Use of cover crops in the southern Amazon region: What is the impact on soil physical quality?. **Geoderma**, v. 384, p. 1-11, 2021.

STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

STÖCKER, C. M. et al. Short-term soil physical quality improvements promoted by na agroforestry system. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 5, p. 2053-2064, 2020.

VAZ, C. M. et al. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 92-101, 2011.

WOITTIEZ, L. S. et al. Yield gaps in oil palm: A quantitative review of contributing factors. **European Journal of Agronomy**, v. 83, p. 57-77, 2017.

YAHYA, Z. et al. Oil palm adaptation to compacted alluvial soil (typic endoaquepts) in Malaysia. **Journal of Oil Palm Research**, v. 24, p. 1533-1541, 2013.

ZURAIDAH, Y. Influence of soil compaction on oil palm yield. **Journal of Oil Palm Research**, v. 31, n. 1, p. 67-72, 2019.

## CAPÍTULO 2 - MANAGEMENT PRACTICES AFFECT SOIL CARBON AND PHYSICAL QUALITY IN OIL PALM AGROFORESTRY SYSTEMS IN THE AMAZON

Capítulo submetido a *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*

### ABSTRACT

Agroforestry systems (AFS) with oil palm are expected to have better soil quality than monocultures of this crop. The variation in soil physical quality between management zones is related to carbon input and is well known in monocultures, but poorly studied in oil palm AFS. Our objective was to determine whether management practices change the carbon content and physical quality of soil in oil palm AFS. We collected undisturbed and disturbed soil samples at different sites (weeded circle, harvest path, leaf pile, and diversified strip) from the 0-5, 5-10, 10-20, and 20-30 cm soil layers in two AFS in Eastern Amazon, Brazil. We determined the soil water retention curve, bulk density, aggregation, penetration resistance, and carbon content. We performed principal component analysis (PCA) to evaluate the influence of management on carbon content and physical properties in different soil layers. Overall, the management zones where there was no machinery traffic (weeded circle, leaf pile, and diversified strip) exhibited a higher carbon content and better physical quality in the surface layers of soil (0-5 and 5-10 cm). These zones differed from the harvest path, which showed worse soil physical quality, that is, lower soil aggregation, porosity, water retention, and carbon content; and greater soil bulk density, compaction, and penetration resistance. Management practices that increase carbon levels on the harvest path should be prioritized to reduce the degradation of soil physical quality. Therefore, our results can help guide a more sustainable management of the soil in oil palm cultivation areas in the Amazon.

**Keywords:** Eastern Amazon. Soil compaction. Soil physical properties. Soil quality.

### 2.1 Introduction

Oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) is a palm tree native to the humid lowland tropics of West Africa (Woittiez et al. 2017). The species belongs to the family *Arecaceae*, cultivated mainly in the countries of southeast Asia, Latin America, and Africa (Hansen et al. 2015). The oil palm seed is the most produced oilseed in the world, accounting for one-fifth of the world's vegetable oil production (Hansen et al. 2015; Tao et al. 2018). Within the Americas, in recent decades, Brazil has shown an increase in the cultivation of this agricultural commodity. Most of the expansion of oil palm growing occurred in the state of Pará (located in the Brazilian Amazon), which is responsible for over 80% of the national palm oil production (Sedap 2021).

The management of oil palm cultivation creates zones on the ground where soil properties vary markedly (Nelson et al. 2015). Management zones in oil palm plantations are determined by (1) the stacking of pruned oil palm leaves; (2) fertilizer application and control of weeds close to the plant stem, in the crown area; and (3) use of agricultural machinery and implements in crop inter-row alleys to harvest the fruits and manage the system. Previous studies in oil palm plantations have shown higher soil carbon and lower soil density in the leaf pile zone ( $22 \text{ g kg}^{-1}$  and  $1.2 \text{ g cm}^{-3}$ , respectively) than in the harvest path zone ( $18 \text{ g kg}^{-1}$  and  $1.4 \text{ g cm}^{-3}$ , respectively) (Ramos et al. 2018) and higher soil density and soil penetration resistance in the harvest path zone ( $1.68 \text{ g cm}^{-3}$  and  $3.90 \text{ MPa}$ , respectively) than in the oil palm planting row ( $1.60 \text{ g cm}^{-3}$  and  $2.22 \text{ MPa}$ , respectively) (Sato et al. 2017). The management carried out in the management zones leads to clear spatial heterogeneity in soil quality (Frazão et al. 2013; Ramos et al. 2018).

In agricultural production systems, soil quality can be evaluated from several quantitative indicators related to chemical (Behera et al. 2020; Málaga et al. 2021; Rüegg et al. 2019), biological (Haron et al. 1998; Silva Junior et al. 2018), and physical properties (Jensen et al. 2019; Jensen et al. 2020; Soares et al. 2021). The impact of soil management on physical properties has been studied in various agricultural systems (Moradi et al. 2015; Polanía-Hincapié et al. 2021; Weber et al. 2021). In general, management that increases soil carbon content often improves the soil physical quality through carbon effects on enhancing soil aggregation and porosity and reducing soil density (Cavalcanti et al. 2020; Polanía-Hincapié et al. 2021).

Diversified cropping systems, such as agroforestry systems, are an important option for the development of more sustainable agriculture in the Amazon region, especially for family farmers (Cherubin et al. 2019; Silva Chaves et al. 2020). Agroforestry systems (AFS) are agricultural production alternatives that can be implemented to recover soil quality and reincorporate many degraded lands in the Amazon for productive and sustainable activities (Cherubin et al. 2019). In general, AFS leads to a greater provision of environmental services—e.g., greater soil carbon storage—than monoculture systems (Chen et al. 2017). The provision of environmental services by agroforestry systems depends on various factors, but usually is well related to adoption time. It is expected that improvement on ecosystem processes gradually increases with tree growth over time, but some studies have reported short-term improvement on soil indicators as well (Stöcker et al. 2020, Thomazini et al. 2015), especially when conservation practices (e.g., fire-free land preparation) are used (Carvalho et al. 2014). Thus, in association with management practices conducive to increasing soil carbon, AFS have the

potential to improve the soil physical quality (Cherubin et al. 2019; Polanía-Hincapié et al. 2021).

Experimental-scale oil palm plantations in AFS have been studied in the Brazilian Amazon (Carvalho et al. 2014; Gomes et al. 2021; Ramos et al. 2018). These studies have shown that oil palm AFS store more carbon in the soil than oil palm monocultures, thus having a greater capacity to improve soil quality (Gomes et al. 2021). Therefore, in view of the land degradation and climate change scenarios, the cultivation of oil palm in AFS combined with the adoption of management practices that ensure greater soil and water conservation may constitute a sustainable alternative for the production of this crop.

Agroforestry systems generally accumulate large amounts of plant litter on the soil, which can contribute to maintaining and improving soil properties (Duarte et al. 2013; Lozano Olivério et al. 2021). Permanent soil cover with plant residues (litter) and the absence of physical disturbances (such as those caused by machinery traffic) lead to an increase in carbon levels, resulting in improved soil physical quality (Cavalcanti et al. 2020; Santos et al. 2021). The higher carbon content positively influences the formation and stabilization of aggregates through the bonds between organic polymers and inorganic surfaces of soil particles (Castro Filho et al. 2002; Tisdall and Oades, 1982). More aggregated soil has higher porosity and lower density (Cavalcanti et al. 2020; Polanía-Hincapié et al. 2021). Systems with less litter accumulation have a lower carbon content and accumulate less organic matter, which translates into lower soil aggregate stability and porosity, and, consequently, lower soil physical quality (Blanco-Canqui and Ruis 2018; Santos et al. 2021).

The impact of management on soil physical properties in oil palm monocultures is well described (Sato et al. 2017; Zuraidah 2019; Yahya et al. 2013). However, there is a dearth of information on the impacts of management on the physical properties of soil in oil palm AFS. This information is important to refine management strategies in aiming at improving the physical quality of soil in production systems.

Soil management can affect the soil organic matter content, which in turn directly influences its physical properties (Azizsoltani et al. 2019; Dlapa et al. 2020). In general, changes in soil structure stemming from increased compaction and decreased aggregate stability reduce porosity, aeration, and root growth, as well as the movement, retention, and availability of water in the soil (Andrade Bonetti et al. 2019; Moradi et al. 2015). Decreasing soil organic carbon contents and increasing soil density and compaction have negative impacts on water retention and, consequently, the physical quality of the soil (Andrade Bonetti et al. 2019; Dlapa et al. 2020).

We hypothesized that the physical quality of soil differs according to the intensity of organic matter input and machinery traffic, which in turn vary markedly between the harvest path and other management zones in oil palm plantations. Our objective was to determine whether management practices change the soil carbon content or physical quality in different management zones in oil palm AFS in Eastern Amazon.

## 2.2 Materials and Methods

### 2.2.1 Study site

The study was carried out on a family farm in the municipality of Tomé Açu, Eastern Amazon, Brazil (02° 20' 54" S, 48° 15' 44" W) (Fig. 1). According to the Köppen classification system, the climate of the region is an Am type (Alvares et al. 2013), with an average annual temperature of 26 °C. Average annual precipitation in the region is 2400 mm, with the rainiest period being from December to June. The soil in the study area is a dystrophic yellow Oxisol (Santos et al. 2018) with a sandy-clay loam texture. Table 1 shows the results of soil particle size and soil fertility analysis of the study area.

We evaluated two 13-year-old oil palm AFS. Each system occupied 2 ha and had oil palm as the species of greatest economic interest. The systems consisted of double rows of oil palm (spacing of 7.5 m between rows and 9.0 m between plants) alternated by strips where herbaceous, shrub, and tree species were planted. In addition to oil palm, the predominant species in the more diversified agroforestry system were *Gliricidia sepium* Jacq, *Inga edulis* Mart, *Acacia mangium* Willd, *Euterpe oleracea* Mart, *Carapa guianensis* Aubl, *Oenocarpus mapora* H. Karsten, *Theobroma cacao* Linn, *Theobroma grandiflorum* Willd. ex Spreng, *Adenanthera pavonina* L., *Calophyllum brasiliense* Cambess, *Tabebuia* sp, *Mangifera indica* L, *Jacaranda copaia* Aubl, *Sclerolobium paniculatum* Vogel, and *Spondias lutea* L.; and in the less diversified agroforestry system, *G. sepium* Jacq and *I. edulis* Mart (Gomes et al. 2021; Silva Maia et al. 2021).

The agroforestry systems were implemented in 2008 in an area previously covered by a successional forest of approximately 10 years. The preparation of the area consisted of slashing and mulching, as described in Carvalho et al. (2014). In addition to organic fertilizers, inorganic fertilizers allowed by Brazilian legislation on organic-based production systems were applied (Mapa 2008).



Organic and inorganic fertilizers were applied in the weeded circle, close to the oil palm stem (Table 2). To harvest the oil palm bunches, a 65-horsepower (hp) tractor (Massey Ferguson 265 4 x 2) was used approximately every 15 days during the productive period. The machinery traffic zone, located between the palm rows, is called harvest path. Weeds in the harvest path and weeded circle zones were mowed mechanically. The palm leaves were pruned and stacked next to the oil palm trees, along the planting row, twice a year. In the diversified strip, 40 kg plant<sup>-1</sup> of organic compost and 10 kg plant<sup>-1</sup> of coal mill and poultry litter were applied in 2008. The pruned material of planted species in the diversified strip and the *T. cacao* fruit shells were deposited on the ground. In the diversified strip, mowing was performed manually.

### **2.2.2 Soil collection**

We marked out four plots measuring 30 m × 30 m in the AFSs so as to include the oil palm double row and the diversified strip. We defined four collection sites (management zones) in each plot according to the spatial arrangement of the species and the management (Fig. 2), namely, (a) weeded circle - fertilized zone where weeds had been removed, situated at 60 cm from the base of the oil palm stem; (b) harvest path - machinery traffic zone; (c) leaf pile - zone where leaves of oil palm (and other species, cocoa mainly) were deposited; and (d) diversified strip.

In each management zone, we collected (1) two undisturbed soil samples using a soil sampling ring (5 cm diameter × 5 cm height); (2) two soil samples in the form of monoliths (10 cm length × 10 cm width × 10 cm height); and (3) five disturbed soil samples using an auger, which we pooled to form a composite sample. We collected both disturbed and undisturbed soil samples from the 0-5, 5-10, 10-20, and 20-30 cm soil layers. Thus, for each management zone this sampling scheme resulted in 16 undisturbed and 4 disturbed soil samples in each soil layer per AFS plot.

### **2.2.3 Analysis of soil samples**

We saturated the undisturbed soil samples for 72 h by capillary rise. After saturation, we weighed the samples to estimate the water content at saturation (0 hPa potential). Then, we subjected the samples to the potentials of 60, 100, 300, and 1000 hPa, in Richards' chamber (Klute 1986). After the cessation of water drainage, at each potential, that is, at the equilibrium

point, we weighed the samples to determine the water content (Teixeira et al. 2017). To determine the water content at the 5000- and 15000-hPa potentials, we used disturbed samples that we had previously crushed and sieved through a 2.0-mm mesh (fine earth). After saturation, we placed the disturbed samples at the 5000- and 15000-hPa potentials in Richards' chamber (Klute 1986), and after cessation of water drainage, we determined the soil wet weight. Finally, we oven-dried the samples at 105 °C for 24 h to determine the soil dry weight on a semi-analytical balance (Teixeira et al. 2017).

We determined the stability of soil aggregates in water as proposed by Madari et al. (2005). After air drying, we gently crushed the samples in an 8.0-mm mesh sieve to separate the aggregates from the soil. We placed two 25 g samples of aggregates (less than 8.0 mm in diameter) on filter paper in a 4.0 mm sieve, then poured water for five minutes to wet the aggregates by capillarity (Madari et al. 2005). Subsequently, we placed the samples of moistened aggregates in a vertical-oscillation sieve shaker with water, at a constant speed of 30 rpm, for 15 min. We used a set of seven sieves with decreasing mesh openings (4.0, 2.0, 1.0, 0.5, 0.25, 0.106, and 0.053 mm). After wet sieving, we applied a gentle jet of water to transfer the samples of aggregates retained on each sieve to aluminum containers. Then, we dried the samples of aggregates in a forced-air oven at 105 °C for 24 h (Teixeira et al. 2017) and determined the dry weight of the samples on a semi-analytical balance accurate to two decimal places.

We used the fine earth samples that were crushed and passed through a 2.0-mm sieve to determine (a) particle size, by the pipette method; (b) particle density, by the volumetric flask method; and (c) soil fertility (Teixeira et al. 2017). We weighed approximately 0.20 g of soil ground through 100 mesh on a balance accurate to four decimal places to determine the carbon content by dry combustion (Vario MACRO cube elemental analyzer, Langensfeld, Germany) (Gomes et al. 2021).

#### **2.2.4 Soil volumetric water content and fitting of water retention curve**

We calculated the volumetric soil water content using the equation below (Teixeira et al. 2017):

$$\text{VWC} = m_{\text{ag}}/v$$

VWC: soil volumetric water content at a given potential (hPa), in  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;  $m_{\text{ag}}$ : mass of water determined gravimetrically, in g; and  $v$ : volume of soil sample in the sampling ring volume, in  $\text{cm}^3$ .

To fit the soil water retention curve (WRC), we used the model proposed by van Genuchten (1980), according to the equation below:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[(1 + \alpha\psi)^n]^m}$$

$\theta$ : soil water content, in  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;  $\theta_r$ : residual water content, in  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;  $\theta_s$ : water content at saturation, in  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;  $\psi$ : pressure potential applied, in hPa; and  $\alpha$ ,  $n$ , and  $m$ : equation-fitting parameters.

We used the root mean square error (RMSE) to analyze the performance of the WRC results, as shown in the equation below:

$$\text{RMSE} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_o - Y_p)^2}}{N}$$

RMSE: root mean square error;  $Y_o$ : observed water potential values;  $Y_p$ : predicted water potential values; and  $N$ : number of observations.

### 2.2.5 Weighted average aggregate diameter (AGGRE) and soil density (SOILD)

We determined the stability of soil aggregates from the weighted average diameter of the aggregates (Castro Filho et al. 2002), using the equation below:

$$\text{AGGRE} = \sum_{i=1}^n x_i w_i / y_i$$

AGGRE: weighted average aggregate diameter, in mm;  $x_i$ : average diameter of each aggregate class, in mm;  $w_i$ : weight of each class of aggregates, in g; and  $y_i$ : total weight of aggregates, in g.

We determined soil density using the equation below (Teixeira et al. 2017):

$$\text{SOILD} = \frac{w_s}{v}$$

SOILD: soil density, in  $\text{g cm}^{-3}$ ;  $w_s$ : weight of soil oven-dried at  $105\text{ }^\circ\text{C}$ , in g; and  $v$ : sampling ring volume, in  $\text{cm}^3$ .

### **2.2.6 Soil microporosity (MICPO), total porosity (TOTPO), macroporosity (MAPCO), and available water (AVAIL)**

We determined microporosity (MICPO) at the potential of 60 hPa and total porosity (TOTPO) as the ratio between soil density and particle density; macroporosity (MACPO) as the difference between total porosity and microporosity; and available water (AVAIL) as the difference between field capacity and permanent wilting point. To calculate these variables, we used the following equations (Teixeira et al. 2017):

$$\text{MICPO} = \frac{(a - b)}{c}$$

MICPO: microporosity, in  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;  $a$ : weight of wet soil at the 60 hPa potential, in g;  $b$ : weight of soil dried at  $105\text{ }^\circ\text{C}$ , in g; and  $c$ : sampling ring volume, in  $\text{cm}^3$ .

$$\text{TOTPO} = 1 - \left( \frac{\text{SOILD}}{\text{PARTD}} \right)$$

TOP: total porosity, in  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ; SOILD: soil density, in  $\text{g cm}^{-3}$ ; and PARTD: particle density, in  $\text{g cm}^{-3}$ .

$$\text{MACPO} = \text{TOTPO} - \text{MICPO}$$

MACPO: macroporosity, in  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ; TOTPO: total porosity, in  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ; and MICPO: microporosity, in  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .

$$\text{AVAIL} = \text{FIELD} - \text{WILTI}$$

AVAIL: soil available water, in  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ; FIELD: soil moisture at field capacity (100 hPa potential), in  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ; and WILTI: soil moisture at permanent wilting point (15000 hPa potential), in  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .

### 2.2.7 Penetration resistance (PENET)

We determined the soil penetration resistance (PENET) using an impact penetrometer (model STOLF, KAMAK, Brazil) with a cone angle of  $30^\circ$ . We transformed the results (obtained in impacts  $\text{dm}^{-1}$ ) into mechanical strength (MPa) using the equation proposed by Stolf et al. (2014):

$$\text{PENET (MPa)} = 5.6 + 6.89 \times \text{N (impacts } \text{dm}^{-1}) \times 0.1$$

PENET: soil penetration resistance, in MPa; and N:  $10 \times$  number of impacts divided by cone penetration, in cm.

### 2.2.8 Soil compaction degree (COMPA) and structural stability index (STRUC)

We determined the degree of soil compaction (COMPA) using soil density and maximum bulk density data. We calculated the soil maximum bulk density by a pedotransfer function (Marcolin and Klein 2011; Santos et al. 2021). We determined the structural stability index (STRUC) according to Santos et al. (2021).

$$\text{COMPA} = \frac{\text{SOILD}}{\text{SOILD}_{\text{max}}} * 100$$

COMPA: soil compaction degree, in %; SOILD: soil density, in  $\text{g cm}^{-3}$ ; and  $\text{SOILD}_{\text{max}}$ : maximum soil bulk density ( $2.03133855 - 0.00320878 * (\text{SOILC} * 1.724) - 0.00076508 * \text{clay}$ ), in  $\text{g cm}^{-3}$ .

$$\text{STRUC} = \frac{\text{SOILC} * 1.724}{\text{silte} + \text{argila}} * 100$$

STRUC: structural stability index, in %; SOILC: soil carbon content, in  $\text{g kg}^{-1}$ ; and silt + clay: sum of silt and clay contents, in  $\text{g kg}^{-1}$ .

### 2.2.9 Statistical analysis

We performed Principal Component Analysis (PCA) to evaluate the soil physical properties in different soil layers. Before subjecting the data to PCA, we standardized the soil physical properties at mean 0 and variance 1 (correlation matrix). We run PCA using the PCA function implemented in R software, MineR package. We ran a one-way ANOVA to test the effects of management zones on the soil variables (separately for each soil layer) and Tukey test ( $p < 0.05$ ) for the multiple comparison of means. Finally, we used Pearson's correlation analysis to assess the strength and direction of correlations between variables. We created a graphical display of the correlation matrix using the `corrplot` function of `corrplot` package. We conducted all statistical procedures using R software v.4.0.1 (R Core Team 2020). We analyzed data from the management zones of each oil palm AFS as a single dataset. To fit the parameters of the soil water retention curve, we used RETC 6.02 software (van Genuchten et al. 1991).

### 2.3 Results

In general, the soil physical properties varied mostly in the more superficial soil layers (Table 3). SOILD (Fig. 3a), PENET (Fig. 3j), and COMPA (Fig. 3l) varied as follows: harvest path > weeded circle  $\geq$  diversified strip = leaf pile. TOTPO (Fig. 3b), MACPO (Fig. 3d), SOILC (Fig. 3h), AGGRE (Fig. 3i), and STRUC (Fig. 3k) were higher in the non-mechanized areas than in the mechanized areas, i.e., leaf pile  $\geq$  diversified strip = weeded circle > harvest path. FIELD and WILTI (Fig. 3e and 3f) did not vary among management zones. AVAIL (Fig. 3g) varied only in the 0-5 cm layer, with higher values in the diversified strip than in the harvest path (Table 3).

The deeper the soil, the lower the variability explained by physical properties in the different management zones. Principal component analysis revealed that the first two axes explained 75.43, 70.65, 66.88, and 51.57% of the total variation in the 0-5, 5-10, 10-20, and 20-30 cm soil layers, respectively (Fig. 4a-d). In the uppermost layers (0-5 and 5-10 cm), PCA clearly distinguished the harvest path from the other management zones (weeded circle, leaf pile, and diversified strip). For these two layers (0-5 and 5-10 cm), axis 1 markedly separated the zone with the most significant soil structural degradation (harvest path), i.e., soils with higher bulk density, degree of compaction, and penetration resistance, from those with higher carbon content, aggregate stability, and porosity (Fig. 4a and 4b). Axis 2 stood out for the variables of microporosity, available water, and moisture at field capacity, separating mainly

the harvest path from the other zones (weeded circle, leaf pile, and diversified strip) in the 0-5 cm layer. In deeper layers (10-20 and 20-30 cm), the physical properties became more homogeneous and dispersed between the management zones, not showing a distinction between the zones as evident as in the upper layers (Fig. 4c and 4d).

In the surface soil layers, the harvest path showed less water retention than the other management zones (Fig. 5a and 5b). Regarding physical parameters as determined by the van Genuchten equation, moisture at saturation ( $\theta_s$ ) and alpha ( $\alpha$ ) were lower on the harvest path than in the other management zones (Table 4).

Of a total of 66 Pearson correlation coefficients, 19 can be considered weak correlations (0.0 to 0.3), 35 moderate correlations (0.31 to 0.7) and 12 strong correlations (0.71 to 1.0) (Fig. 6). Soil carbon content was positively correlated with AGGRE ( $r = 0.57$ ), TOTPO ( $r = 0.64$ ), MACPO ( $r = 0.62$ ), and STRUC ( $r = 0.96$ ) and negatively with PENET ( $r = -0.58$ ), COMPA ( $r = -0.68$ ), SOILD ( $r = -0.71$ ), and WILTI ( $r = -0.41$ ). Soil density showed a moderate positive correlation with PENET (0.64), a strong correlation with COMPA (0.97), strong negative correlations with TOTPO (-0.90) and MACPO (-0.84), and moderate negative correlations with STRUC (-0.69) and AGGRE ( $r = -0.67$ ). There was a strong positive correlation ( $r = 0.94$ ) between TOTPO and MACPO. Total porosity and MACPO showed moderate negative correlations with PENET ( $r = -0.57$  and  $-0.61$ ) and strong negative correlations with COMPA ( $r = -0.86$  and  $-0.84$ ), respectively.

## 2.4 Discussion

In general, the management zones that were not mechanized and had significant input of organic matter showed higher soil physical quality than the management zone that was mechanized and had the lowest organic matter input. The weeded circle, leaf pile, and diversified strip zones showed greater soil aggregation, structural stability, porosity, water retention, and carbon contents and lower soil penetration resistance, degree of compaction, and soil density than the harvest path. Despite the similar soil physical quality among the management zones without machinery traffic (weeded circle, leaf pile, and diversified strip), the factors that predominantly influence the physical properties of the soil in these zones are different.

In the weeded circle zone, the palm roots probably contributed to the maintenance of high carbon levels, which might have positively affected the soil physical quality. Other studies have also shown that carbon contents are higher and soil density is lower near the oil palm stem than on the harvest path, and largely attributed this difference to the roots (Frazão et al. 2013, 2014;

Ramos et al. 2018). The oil palm root system is fasciculate, deep, and abundant, thus constituting an important source of carbon for the soil (Carvalho et al. 2014; Jourdan and Rey 1997).

In addition to the palm roots, the organic matter management may also have contributed to improve the soil physical quality of the weeded circle zone. Empty bunches of oil palm fruits and other organic fertilizers were periodically placed on the weeded circle, close to the plant stem (Table 2). The organic fertilization may increase soil macroaggregation and the soil aggregate stability (Chen et al. 2020). Other studies have also shown that increased soil carbon improves aggregate formation and stabilization, leading to increased soil porosity and decreased soil density (Castro Filho et al. 2002; Souza et al. 2019). In summary, organic management, the absence of machinery traffic, and, possibly, the root system of oil palm are the main factors that led to the higher carbon content and better physical conditions of soil under the weeded circle versus under the harvest path.

In the leaf pile zone, where leaves of oil palm and pruned leaves of cocoa are deposited, the soil showed a physical quality similar to that found under the weeded circle and the diversified strip (Fig. 4). It is suggested that, coupled with the absence of machinery traffic, the continuous supply of organic matter (mostly pruned leaves) likely contributed to improve the soil physical quality in the leaf pile zone. The litter layer in the leaf pile zone may be even higher than in the diversified strip in oil palm agroforestry systems (Ramos et al. 2018) similar to those that we studied. Such high accumulation of organic matter in the leaf pile zone leads to increased soil carbon and root stocks (Ramos et al. 2018) which may improve the soil physical quality (Frazão et al. 2013, 2014; Ramos et al. 2018; Rüegg et al. 2019), compared with the harvest path.

In the diversified strip, improved soil physical quality and carbon may be related to various factors. First, carbon input via litterfall, especially from *T. cacao*, the species of highest density in the diversified strip zone, was probably the factor responsible for the higher soil carbon content in this zone compared with the harvest path. In addition, the cocoa pruning management, the maintenance of the fruit shells (after removing the seeds) at harvesting, and application of organic fertilizers (to cocoa trees and açai palms) represent other sources of organic matter in the diversified strip. Second, the diverse root systems typical of agroforestry systems species may be another source of carbon that improves soil aggregation (Chen et al. 2017). Thus, carbon contribution to the soil via litter, roots, pruning management, and organic fertilizers should benefit soil physical quality in the diversified strip zone (Chen et al. 2020; Cherubin et al. 2019; Polanía-Hincapié et al. 2021). Furthermore, the absence of machinery



traffic in the diversified strip contributes to the maintenance of physical quality in this zone, compared with the harvest path.

Some soil physical variables reached critical levels in the harvest path zone likely resulting from a combination of machinery impact and low organic matter input. In the harvest path zone, soil density (Fig. 3a) was well above the ideal ( $1.40 \text{ g cm}^{-3}$ ), according to Arshad et al. (1997), and close to the critical threshold for sandy loam soils ( $1.75\text{-}1.80 \text{ g cm}^{-3}$ ), according to Sato et al. (2015). Other physical properties reached critical values, e.g., macroporosity ( $<0.10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) (Fig. 3d), penetration resistance ( $>2.0 \text{ MPa}$ ) (Fig. 3j), and degree of compaction ( $>90\%$ ) (Fig. 3l). Taken together, these results indicate soil structure degradation at a level that can limit root growth (Colombi et al. 2018; Oliveira et al. 2016; Zuraidah et al. 2010) on the harvest path.

In the harvest path zone, lower  $\alpha$  values compared with the other management zones indicate less presence of large pores (macropores) in the soil (Soares et al. 2021; van Genuchten 1980), which is also characteristic of physical soil degradation. Reduced soil macroporosity may decrease soil water and gas fluxes (Weber et al. 2021) and negatively affect plant productivity when the growth and respiration of plant roots decrease (Ferreira et al. 2021; Vizioli et al. 2021). Thus, management practices that improve physical properties in the harvest path zone should reduce the impediment to root growth in oil palm (Zuraidah et al. 2010).

Machinery traffic probably decreased soil aggregation in the harvest path zone. The higher amount of smaller aggregates on the harvest path is likely due to the breakage of larger diameter aggregates caused by machinery traffic, as is usually observed in mechanized areas (Santos et al. 2021; Weber et al. 2021). This reduction in aggregate size causes compaction (Sato et al. 2017; Weber et al. 2021), reduces pore space, and increases soil density and penetration resistance (Azizsoltani et al. 2019; Sato et al. 2017; Zuraidah 2019). Low soil carbon content also contributes to reduce soil aggregate stability (Frozzi et al. 2020), as we found in our study. Thus, the lower aggregate stability on the harvest path compared with that seen in the other management zones renders the soil more susceptible to compaction in that zone (Santos et al. 2021; Weber et al. 2021).

The lower soil carbon content on the harvest path probably contributed to the reduction of structural pores (inter-aggregates) and consequently reduced water retention at low potentials. There is a direct relationship between carbon content and inter-aggregate pores (Dexter et al. 2008a; Dexter et al. 2008b). The higher soil carbon contents in the weeded circle, leaf pile, and diversified strip zones probably increased soil aggregation and, consequently, the formation of inter-aggregate pores which, in turn, increased soil water retention, corroborating

the reports of Dexter et al. (2008a). Soil organic carbon is important to (improve aggregation) and increase water retention at low soil potentials through the structural pores (Andrade Bonetti et al. 2019; Dlapa et al. 2020). On the harvest path, the lower water retention (Fig. 5) from saturation (0 hPa) to around 60 hPa is also likely associated with machinery traffic, which causes compaction and destruction of structural pores, with possible negative impacts on water infiltration and retention, as also described in other studies (Andrade Bonetti et al. 2019; Dlapa et al. 2020). Thus, high organic matter input and low soil structural disturbance lead to higher soil water infiltration and retention (Andrade Bonetti et al. 2019; Libohova et al. 2018).

In our study, we identified a distinct spatial variation in soil physical properties as a function of the management adopted in the oil palm AFS. The zones where management generates permanent soil cover with plant residues and carbon addition via organic fertilizers show better levels of physical properties and, therefore, better soil physical quality. In addition to soil cover and organic fertilizer, the absence of mechanization in these zones should also help to maintain adequate levels of soil physical quality. On the other hand, soil physical quality is degraded in the zone in which the fruits are harvested mechanically (harvest path) and where the organic matter input from the aerial part is negligible.

To mitigate the degradation of soil quality on the harvest path, we suggest some specific practices to the farmers: maintaining the weed vegetation that grows on the harvest path; expanding the oil palm leaf distribution area, including the harvest path. Such recommendations may help to increase organic matter stocks in surface soil layer, which may mitigate the degradation of soil structure. The transport of the bunches of oil palm (and other fruits) with steel cables may further help to diminish the impacts on the soil physical quality in the harvest path. Therefore, our recommendations can guide oil palm farmers to adopt a management approach that contributes to improving soil physical quality in oil palm plantations in the Eastern Amazon.

## **2.5 Conclusion**

Soil physical quality and soil carbon were distinctly improved in the areas that were not mechanized and where organic matter input was high. The management of organic matter particular to each management zones affects the physical quality mainly on the uppermost soil layers (0-5 and 5-10 cm).

On the harvest path—a machinery traffic zone—, various indicators of soil physical quality are above the critical threshold for root growth in oil palm. Management practices that

increase carbon levels on the harvest path should reduce physical degradation of the soil in this management zone.

The association of non-mechanization and organic matter input keep a good status of soil physical quality and soil carbon in oil palm agroforestry systems. In general, our results can guide a more sustainable soil management in oil palm crops in the Amazon, and have important implications for the expansion of oil palm agroforestry systems in a sustainable way in this region.

### **Conflict of interest statement**

On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

### **Acknowledgments**

We thank the farmers who contributed to this study. We also thank the SAF Dendê project “Reconciling conservation with livelihoods”, funded by the United States Agency for International Development (USAID) and born out of a partnership between the Mixed Agricultural Cooperative of Tomé-Açu (CAMTA), Natura Inovação e Tecnologia de Produtos - Ltd., Embrapa Eastern Amazon (CPATU), and the International Center for Agroforestry Research (ICRAF). We also extend our thanks to the Amazon Foundation for the Support of Studies and Research in the State of Pará (FAPESPA) for the fellowship granted to RLLO and the young researcher scholarship granted to ABV-J (case 2021/658276), and to the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for the research productivity fellowship granted to SSV (case no. 312038/2015).

## References

- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Moraes Gonçalves JL, Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol Z* 22:711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Andrade Bonetti J, Anghinoni I, Gubiani PI, Cecagno D, Moraes MT (2019) Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. *Soil Tillage Res* 186:280-291. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.003>
- Arshad MA, Lowery B, Grossman B (1997) Physical tests for monitoring soil quality. *Methods for assessing soil quality* 49:123-141. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c7>
- Azizsoltani E, Honarjoo N, Ayoubi S (2019) How soil pore distribution could help in soil quality studies as an appropriate indicator. *Eurasian Soil Sc* 52:654-660. <https://doi.org/10.1134/S1064229319060036>
- Barbosa LC, Magalhães PSG, Bordonal RO, Cherubin MR, Castioni GAF, Tenelli S, Carvalho JLN (2019) Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. *Soil Tillage Res* 195:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104383>
- Barik K, Aksakal EL, Islam KR, Sari S, Angin I (2014) Spatial variability in soil compaction properties associated with field traffic operations. *Catena* 120:122-133. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.013>
- Behera SK, Shukla AK, Suresh K, Manorama K, Mathur R K, Kumar A, Tripathi A (2020) Oil palm cultivation enhances soil pH, electrical conductivity, concentrations of exchangeable calcium, magnesium, and available sulfur and soil organic carbon content. *Land Degrad Dev* 31:2789-2803. <https://doi.org/10.1002/ldr.3657>
- Blanco-Canqui H, Ruis SJ (2018) No-tillage and soil physical environment. *Geoderma* 326:164-200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>

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. *Agroforest Syst* 88:357-368. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9689-2>

Castro Filho CD, Lourenço A, Guimarães MDF, Fonseca ICB (2002) Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil. *Soil Tillage Res* 65:45-51. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00275-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00275-6)

Cavalcanti RQ, Rolim MM, Lima RP, Tavares UE, Pedrosa EM, Cherubin MR (2020) Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. *Geoderma* 370:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114353>

Chen C, Liu W, Jiang X, Wu J (2017) Effects of rubber-based agroforestry systems on soil aggregation and associated soil organic carbon: Implications for land use. *Geoderma* 299:13-24. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.021>

Chen Y, Ren K, Su J, He X, Zhao G, Hu B, Zou C (2020) Rotation and organic fertilizers stabilize soil water-stable aggregates and their associated carbon and nitrogen in flue-cured tobacco production. *J Soil Sci Plant Nutr* 20:192-205. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00118-8>

Cherubin MR, Chavarro-Bermeo JP, Silva-Olaya AM (2019) Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. *Agroforest Syst* 93:1741-1753. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0282-y>

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>

Couto WH, Anjos LHC, Wadt PGS, Pereira MG (2016) Soil attributes and resistance to penetration in agroforestry system areas in southwestern Amazon. *Ciência Florestal* 26:811-823.

Dexter AR, Czyż EA, Richard G, Reszkowska A (2008a) 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>

Dexter AR, Richard G, Arrouays D, Czyż EA, Jolivet C, Duval O (2008b) Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma* 144:620-627. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.01.022>

Dłapa P, Hrinik D, Hrabovský A, Simkovic I, Zarnovican H, Sekucia F, Kollar J (2020) The Impact of land-use on the hierarchical pore size distribution and water retention properties in loamy soils. *Water* 12:1-13. <https://doi.org/10.3390/w12020339>

Duarte EM, Cardoso IM, Stijnen T, Mendonça MAF, Coelho MS, Cantarutti RB, Mendonça ES (2013) Decomposition and nutrient release in leaves of Atlantic Rainforest tree species used in agroforestry systems. *Agroforest Syst* 87:835-847. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9600-6>

Ferreira CJB, Tormena CA, Severiano EDC, Zotarelli L, Betioli Júnior E (2021) Soil compaction influences soil physical quality and soybean yield under long-term no tillage. *Arch Agron Soil Sci* 67:383-396. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1733535>

Frazão LA, Paustian K, Cerri CE, Cerri CC (2013) Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. *Gcb Bioenergy* 5:384-390. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01196.x>

Frazão LA, Paustian K, Cerri CE, Cerri CC (2014) Soil carbon stocks under oil palm plantations in Bahia State, Brazil. *Biomass and Bioenergy* 62:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.031>

Frozzi JC, Cunha JM, Campos MCC, Bergamin AC, Brito WBM, Fraciscon U, Brito Filho EG (2020) Physical attributes and organic carbon in soils under natural and anthropogenic environments in the South Amazon region. *Environ Earth Sci* 79:1-15.

<https://doi.org/10.1007/s12665-020-08948-x>

Gomes MF, Vasconcelos SS, Viana-Junior AB, Costa ANM, Barros PC, Ryohei Kato O, Castellani DC (2021) Oil palm agroforestry shows higher soil permanganate oxidizable carbon than monoculture plantations in Eastern Amazonia. *Land Degrad Dev* 32:4313-4326.

<https://doi.org/10.1002/ldr.4038>

Hansen SB, Padfield R, Syayuti K, Evers S, Zakariah Z, Mastura S (2015) Trends in global palm oil sustainability research. *J Clean Prod* 100:140-149.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.051>

Haron K, Brookes PC, Anderson JM, Zakaria ZZ (1998) Microbial biomass and soil organic matter dynamics in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantations, West Malaysia. *Soil Biol Biochem* 30:547-552. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00217-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00217-4)

Jensen JL, Schjønning P, Watts CW, Christensen BT, Munkholm LJ (2019) Soil Water Retention: Uni-Modal Models of Pore-Size Distribution Neglect Impacts of Soil Management. *Soil Sci Soc Am J* 83:18-26. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.06.0238>

Jensen JL, Schjønning P, Watts CW, Christensen BT, Munkholm LJ (2020) Short-term changes in soil pore size distribution: Impact of land use. *Soil Tillage Res* 199:1-7.

<https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104597>

Jourdan C, Rey H (1997) Architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. *Plant Soil* 189:33-48. <https://doi.org/10.1023/A:1004290024473>

Klute, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison: ASA-SSSA, 1986, cap. 26, p. 635-660.

Libohova Z, Seybold C, Wysocki D, Wills S, Schoeneberger P, Williams C, Owens PR (2018) Reevaluating the effects of soil organic matter and other properties on available water-holding

capacity using the National Cooperative Soil Survey Characterization Database. *J Soil Water Conserv* 73:411-421. <https://doi.org/10.2489/jswc.73.4.411>

Lozano Olivério G, Santos Batista Bonini C, Fernanda Dias Souza J, Luís Sanchez Perusso R, Meirelles GC, Andrighetto C, Moreira A (2021) Water infiltration, resistance to penetration and soil moisture in integrated agricultural yield systems over time. *Commun Soil Sci Plant Anal* 2:1-10. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1993888>

Madari B, Machado PL, Torres E, Andrade AG, Valencia LI (2005) No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. *Soil Tillage Res* 80:185-200. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.006>

Málaga N, Hergoualc'h K, Kapp G, Martius C (2021) Variation in vegetation and ecosystem carbon stock due to the conversion of disturbed forest to oil palm plantation in Peruvian Amazonia. *Ecosystems* 24:351-369. <https://doi.org/10.1007/s10021-020-00521-8>

MAPA (2008) Instrução Normativa n. 64 de 18 de dezembro de 2008. (in Portuguese)

Marcolin CD, Klein VA (2011) Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. *Acta Sci Agron* 33:349-354. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.6120> (in Portuguese)

Moradi A, Sung CTB, Goh KJ, Hanif AHM, Ishak C F (2015) Effect of four soil and water conservation practices on soil physical processes in a non-terraced oil palm plantation. *Soil Tillage Res* 145:62-71. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.08.005>

Nelson PN, Banabas M, Goodrick I, Webb MJ, Huth NI, O'Grady D (2015) Soil sampling in oil palm plantations: a practical design that accounts for lateral variability at the tree scale. *Plant Soil* 394:421-429. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2490-9>

Oliveira PDD, Sato MK, Lima HVD, Rodrigues S, Silva APD (2016) Critical limits of the degree of compactness and soil penetration resistance for the soybean crop in N Brazil. *J Plant Nutr Soil Sci* 179:78-87. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400315>



Polanía-Hincapié KL, Olaya-Montes A, Cherubin MR, Herrera-Valencia W, Ortiz-Morea FA, Silva-Olaya AM (2021) Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. *Geoderma* 386:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114900>

R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.

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. *Agroforest Syst* 92:221-237. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0131-4>

Rüegg J, Quezada JC, Santonja M, Ghazoul J, Kuzyakov Y, Buttler A, Guillaume T (2019) Drivers of soil carbon stabilization in oil palm plantations. *Land Degrad Dev* 30:1904-1915. <https://doi.org/10.1002/ldr.3380>

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho MR, Cunha TJJ (eds) (2018) Sistema brasileiro de classificação de solos. Embrapa, Brasília. (in Portuguese)

Santos RS, Wiesmeier M, Cherubin MR, Oliveira DM, Locatelli JL, Holzschuh M, Cerri CE (2021) Consequences of land-use change in Brazil's new agricultural frontier: A soil physical health assessment. *Geoderma* 400:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115149>

Sato MK, Lima HV, Oliveira PD, Rodrigues S (2015) Critical soil bulk density for soybean growth in Oxisols. *Int Agrophys* 29:441-447. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0050>

Sato MK, Lima HVD, Ferreira RLDC, Rodrigues S, Silva ÁPD (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>

SEDAP, 2021. Secretária de Estado de Desenvolvimento Agropecuário e da Pesca. Available: <<http://www.sedap.pa.gov.br/content/dend%C3%AA>>. Accessed on: 02 Nov. 2021. (in Portuguese)

Sher Y, Baker NR, Herman D, Fossum C, Hale L, Zhang X, Firestone M (2020) Microbial extracellular polysaccharide production and aggregate stability controlled by switchgrass (*Panicum virgatum*) root biomass and soil water potential. *Soil Biol Biochem* 143:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107742>

Silva Chaves SF, Gama MAP, Alves RM, Oliveira RP, Neto JLP, Lima VMN (2020) Evaluation of physicochemical attributes of a yellow latosol under agroforestry system as compared to secondary forest in the Eastern Amazon. *Agroforest Syst* 94:1903-1912. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00513-6>

Silva Junior AC, Ruivo MDLP, Silva CM, Okumura RS (2018) Seasonal variation of soil attributes in oil palm plantations in the Eastern Amazon. *Rev Bras Cienc Agrar* 3:1-8. <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i2a5531>

Silva Maia R, Vasconcelos SS, Viana-Junior AB, Castellani DC, Kato OR (2021) Oil palm (*Elaeis guineensis*) shows higher mycorrhizal colonization when planted in agroforestry than in monoculture. *Agroforest Syst* 95:731-740. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00627-5>

Soares MB, Tavanti RFR, Rigotti AR, Lima JP, Silva Freddi O, Petter FA (2021) Use of cover crops in the southern Amazon region: What is the impact on soil physical quality? *Geoderma* 384:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114796>

Souza FG, Campos MCC, Brito Filho EG, Cunha JM, Lima AFL, Sales MCG, Santos LAC (2019) Physical attributes of soil under amazon forest conversion for different crop systems in southern Amazonas, Brazil. *Can J Soil Sci* 99:563-574. <https://doi.org/10.1139/cjss-2019-0070>

Stöcker CM, Bamberg AL, Stumpf L, Monteiro AB, Cardoso JH, Lima ACR (2020) Short-term soil physical quality improvements promoted by an agroforestry system. *Agroforest Syst* 94:2053-2064. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00524-3>

Stolf R, Murakami JH, Brugnaro C, Silva LG, Silva LCFD, Margarido LAC (2014) Penetrômetro de impacto stolf-programa computacional de dados em EXCEL-VBA. *Rev Bras Ci Solo* 38:774-782. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300009> (in Portuguese)

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>

Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG (eds) (2017) *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Embrapa, Brasília. (in Portuguese)

Thomazini A, Mendonça ES, Cardoso IM, Garbin ML (2015) SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. *Geoderma Reg* 5:15-24. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.02.003>

Tisdall JM, Oades JM (1982) Organic matter and water stable aggregates in soil. *J Soil Sci* 33:141-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>

van Genuchten MT (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 Genuchten MT, LEIJ FJ, Yates SR (1991) The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. US Salinity Lab., USDA, Riverside, CA.

Vizioli B, Cavalieri-Polizeli KMV, Tormena CA, Barth G (2021) Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol. *Soil Tillage Res* 209:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104935>

Weber LL, Cavalieri-Polizeli KMV, Zimmermann GG, Tormena CA, Keller T, Jasper SP (2021) Impact of Self-Propelled Sprayer Traffic on Ferralsol Physical Properties in Southern Brazil. *J Soil Sci Plant Nutr* 3:1-10. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00581-2>

Woittiez LS, Van Wijk MT, Slingerland M, Van Noordwijk M, Giller KE (2017) Yield gaps in oil palm: A quantitative review of contributing factors. *Eur J Agron* 83:57-77. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.002>

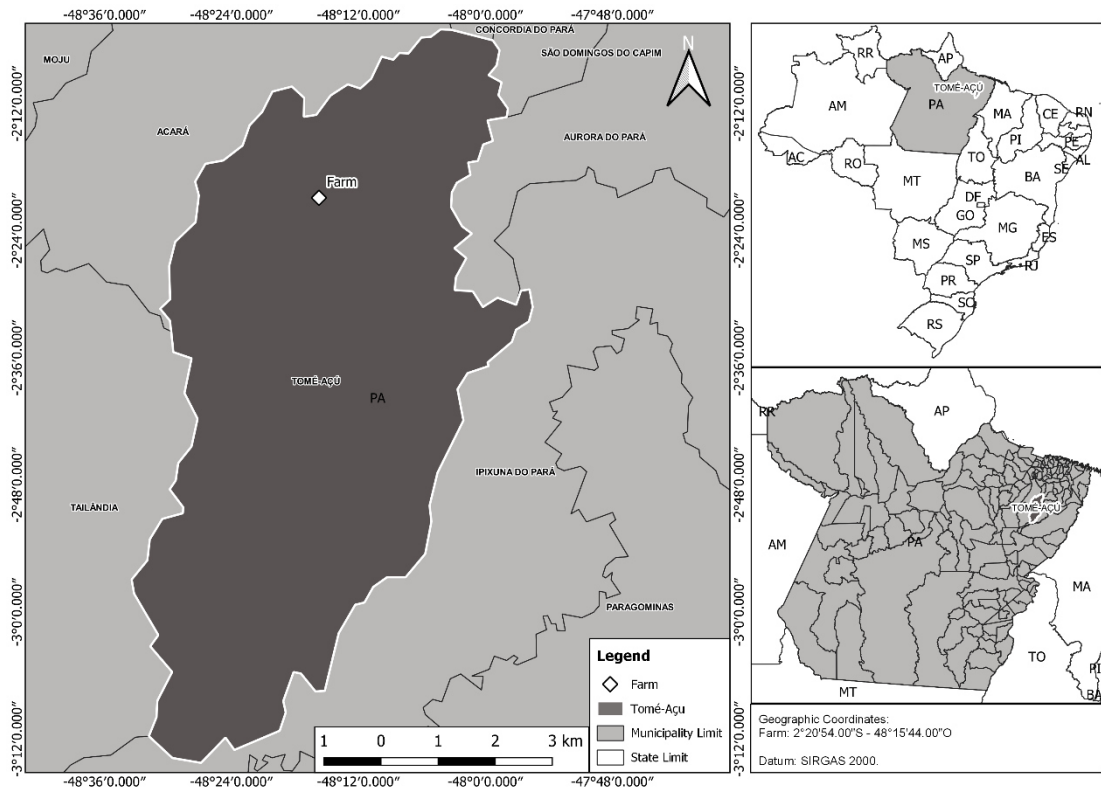
Xiao L, Yao K, Li P, Liu Y, Chang E, Zhang Y, Zhu T (2020) Increased soil aggregate stability is strongly correlated with root and soil properties along a gradient of secondary succession on the Loess Plateau. *Ecol Eng* 143:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105671>

Yahya Z, Tarmizi Mohammed A, Harun MH, Shuib RA (2013) Oil palm adaptation to compacted alluvial soil (Typic Endoaquepts) in Malaysia. *J Oil Palm Res* 24:1533-1541.

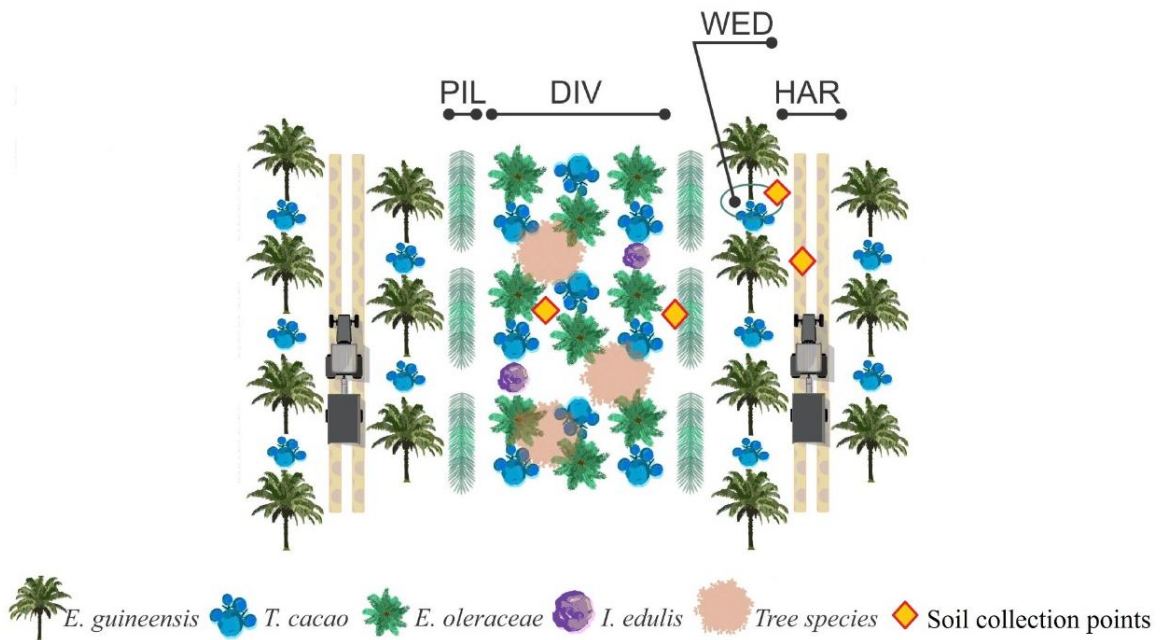
Zuraidah Y, Aminuddin H, Jamal T, Jamarei O, Osumanu HÁ, Mohamadu BJ (2010) Oil palm (*Elaeis guineensis*) roots response to mechanization in Bernam series soil. *American Journal of Applied Sciences* 7:343-348.

Zuraidah Y (2019) Influence of soil compaction on oil palm yield. *J Oil Palm Res* 31:67-72.

**Fig. 1** Location map of the oil palm agroforestry systems in Tomé-Açu, Eastern Amazon, Brazil.



**Fig. 2** Soil sampling sites in the oil palm agroforestry systems in Tomé-Açu, Eastern Amazon, Brazil. PIL, leaf pile; DIV, diversified strip; WED, weeded circle; HAR, harvest path.



**Table 1** Soil fertility and particle size distribution in the oil palm agroforestry systems in Tomé-Açu, Eastern Amazon, Brazil. Data are mean  $\pm$  standard error.

Soil fertility	Depth (cm)				Units
	0-5	5-10	10-20	20-30	
pH H <sub>2</sub> O	5.90 $\pm$ 0.05*	5.80 $\pm$ 0.04	5.70 $\pm$ 0.05	5.40 $\pm$ 0.06	
SOM	21.05 $\pm$ 1.55	18.00 $\pm$ 1.72	12.90 $\pm$ 0.96	8.80 $\pm$ 0.79	g kg <sup>-1</sup>
P	44.90 $\pm$ 10.77	18.70 $\pm$ 5.77	6.50 $\pm$ 1.98	3.50 $\pm$ 1.04	mg dm <sup>-3</sup>
K	62.90 $\pm$ 4.50	58.10 $\pm$ 5.19	58.20 $\pm$ 5.95	42.00 $\pm$ 5.10	mg dm <sup>-3</sup>
Na	2.00 $\pm$ 0.08	1.90 $\pm$ 0.12	2.10 $\pm$ 0.11	1.90 $\pm$ 0.10	mg dm <sup>-3</sup>
Ca	4.90 $\pm$ 0.29	3.90 $\pm$ 0.21	2.60 $\pm$ 0.12	1.90 $\pm$ 0.13	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>
Mg	1.00 $\pm$ 0.05	1.00 $\pm$ 0.05	0.70 $\pm$ 0.05	0.50 $\pm$ 0.03	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>
Al	0.10 $\pm$ 0.01	0.20 $\pm$ 0.01	0.15 $\pm$ 0.01	0.15 $\pm$ 0.02	Cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>
H+Al	2.40 $\pm$ 0.09	2.40 $\pm$ 0.10	2.30 $\pm$ 0.11	2.30 $\pm$ 0.08	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>
<b>Granulometry</b>					
Sand	670.00 $\pm$ 8.86	638.00 $\pm$ 7.03	596.00 $\pm$ 6.69	519.00 $\pm$ 7.22	g kg <sup>-1</sup>
Silt	153.00 $\pm$ 6.10	155.00 $\pm$ 5.18	142.00 $\pm$ 4.86	155.00 $\pm$ 5.09	g kg <sup>-1</sup>
Clay	177.00 $\pm$ 5.39	207.00 $\pm$ 4.84	262.00 $\pm$ 6.73	326.00 $\pm$ 7.95	g kg <sup>-1</sup>

SOM: soil organic matter. \* Mean error.

**Table 2** History of fertilizer and lime application in the oil palm agroforestry systems in Tomé-Açu, Eastern Amazon, Brazil.

Lime/fertilizer	Unit	Oil palm											Diversified strip			
		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2008	2017	2018	
Limestone <sup>d</sup>	kg ha <sup>-1</sup>													1300 <sup>b</sup>	2067 <sup>a</sup>	
ARAD reactive rock phosphate <sup>e</sup>	kg plant <sup>-1</sup>	0.3		1	1.5							0.7	2.5	0.3 <sup>a</sup>	0.7 <sup>a</sup>	2.5 <sup>a</sup>
Chaff charcoal <sup>f</sup>	kg plant <sup>-1</sup>	10												10 <sup>b</sup>		
Chicken manure <sup>g</sup>	kg plant <sup>-1</sup>													10 <sup>b</sup>		
Bone meal <sup>h</sup>	kg plant <sup>-1</sup>		1	0.5	0.5											
Castor cake <sup>i</sup>	kg plant <sup>-1</sup>		2	2	4											
Oil palm cake <sup>j</sup>	kg plant <sup>-1</sup>									30	30	40			30 <sup>a</sup>	40 <sup>a</sup>
FTE BR12 <sup>k</sup>	kg plant <sup>-1</sup>			0.3	0.2											
Empty fruit bunches of oil palm <sup>l</sup>	kg plant <sup>-1</sup>			100	221	150	200	240	240							
Borax <sup>m</sup>	kg plant <sup>-1</sup>	10		0.1												
Organic compost <sup>n</sup>	kg plant <sup>-1</sup>		40											40 <sup>b</sup>		
Yoorin <sup>o</sup>	kg plant <sup>-1</sup>									1.5						
Produbor 10 <sup>p</sup>	kg plant <sup>-1</sup>										0.1	0.15		0.1 <sup>c</sup>		
Potassium polysulfate <sup>q</sup>	kg plant <sup>-1</sup>										2.6	9			2.6 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>
Potassium sulfate <sup>r</sup>	kg plant <sup>-1</sup>	40					0.8	0.8	0.4	1.8						

<sup>a</sup> *Theobroma cacao* and *Euterpe oleracea*

<sup>b</sup> Fertilizer applied over the entire strip

<sup>c</sup> *Euterpe oleracea*

<sup>d</sup> Mg: 12%; Ca: 38%

<sup>e</sup> P: 10%; Ca: 37%

<sup>f</sup> K: 5.9%; Mg: 2.8%; Ca: 15.40%

<sup>g</sup> N: 2.58%; P: 2.27%; K: 2.31%; Mg: 0.44%; Ca: 30%

<sup>h</sup> N: 2%; P: 20%; K: 0.12%; Mg: 0.24%; Ca: 30%

<sup>i</sup> N: 5.44%; P: 1.91%; K: 1.54%; Mg: 0.5%; Ca: 1.8%

<sup>j</sup> N: 2.4%; P: 0.56%; K: 0.61%; Mg: 0.01%; Ca: 4%; S: 0.4%; Zn: 0.01%; B: 0.05%

<sup>k</sup> B: 1.8%; Cu: 0.85%; Mn: 2.0%; Zn: 9.0%; S: 3.9%

<sup>l</sup> N: 0.33%; P: 0.04%; K: 0.55%; Mg: 0.09%; Ca: 0.28%; S: 0.04%

<sup>m</sup> B: 20.8%; B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 67%

<sup>n</sup> N: 0.80%; P: 0.40%; K: 0.30%; Mg: 0.10%; Ca: 0.23%; S: 0.03%

<sup>o</sup> P: 16%; Mg: 7%; Ca: 18%; S: 6%; Zn: 0.55%; B: 0.1%

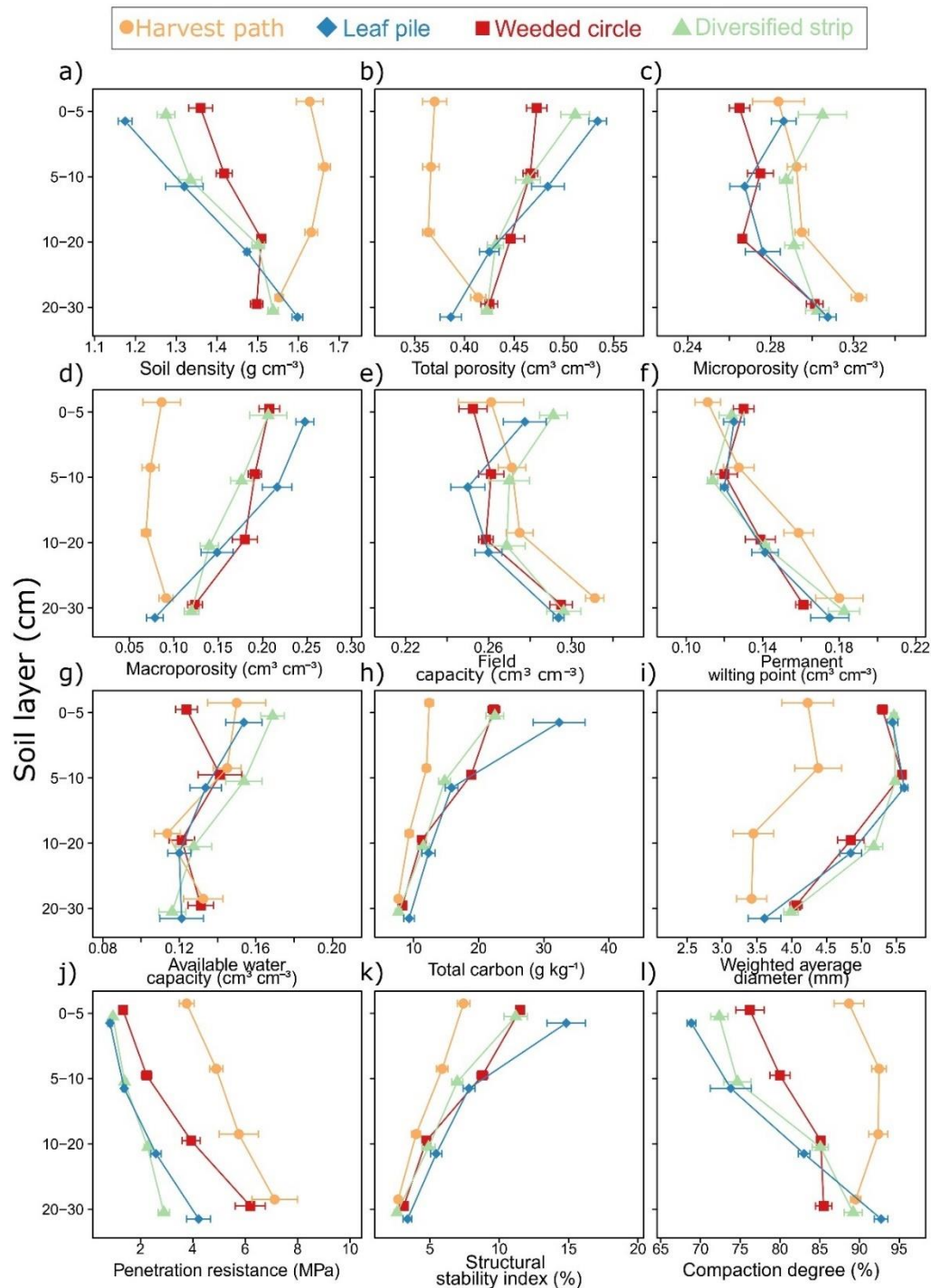
<sup>p</sup> B: 10%

<sup>q</sup> K: 14.0%; Mg: 3.5%; Ca: 12%; S: 19%

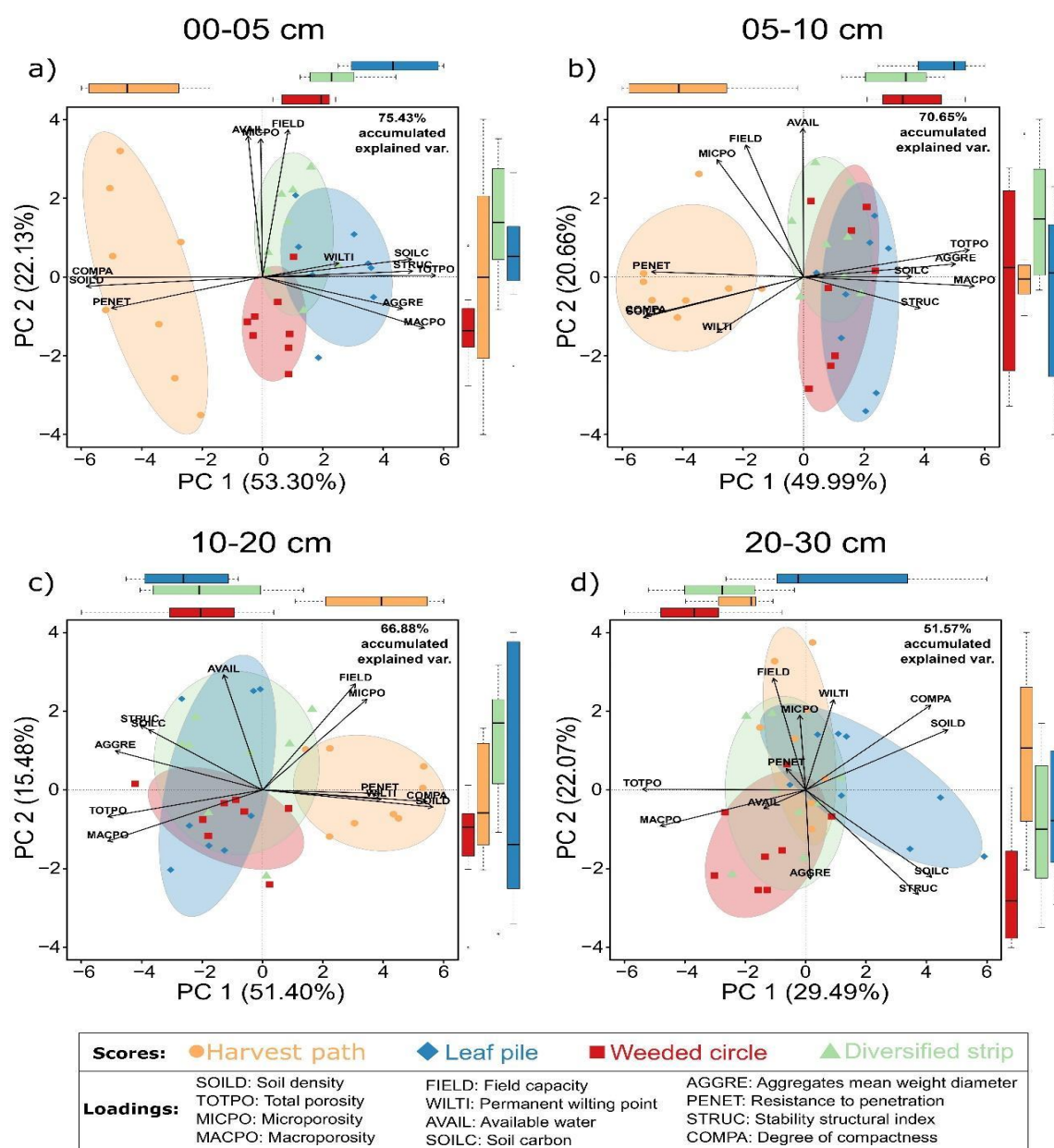
<sup>r</sup> K: 50%; S: 18%



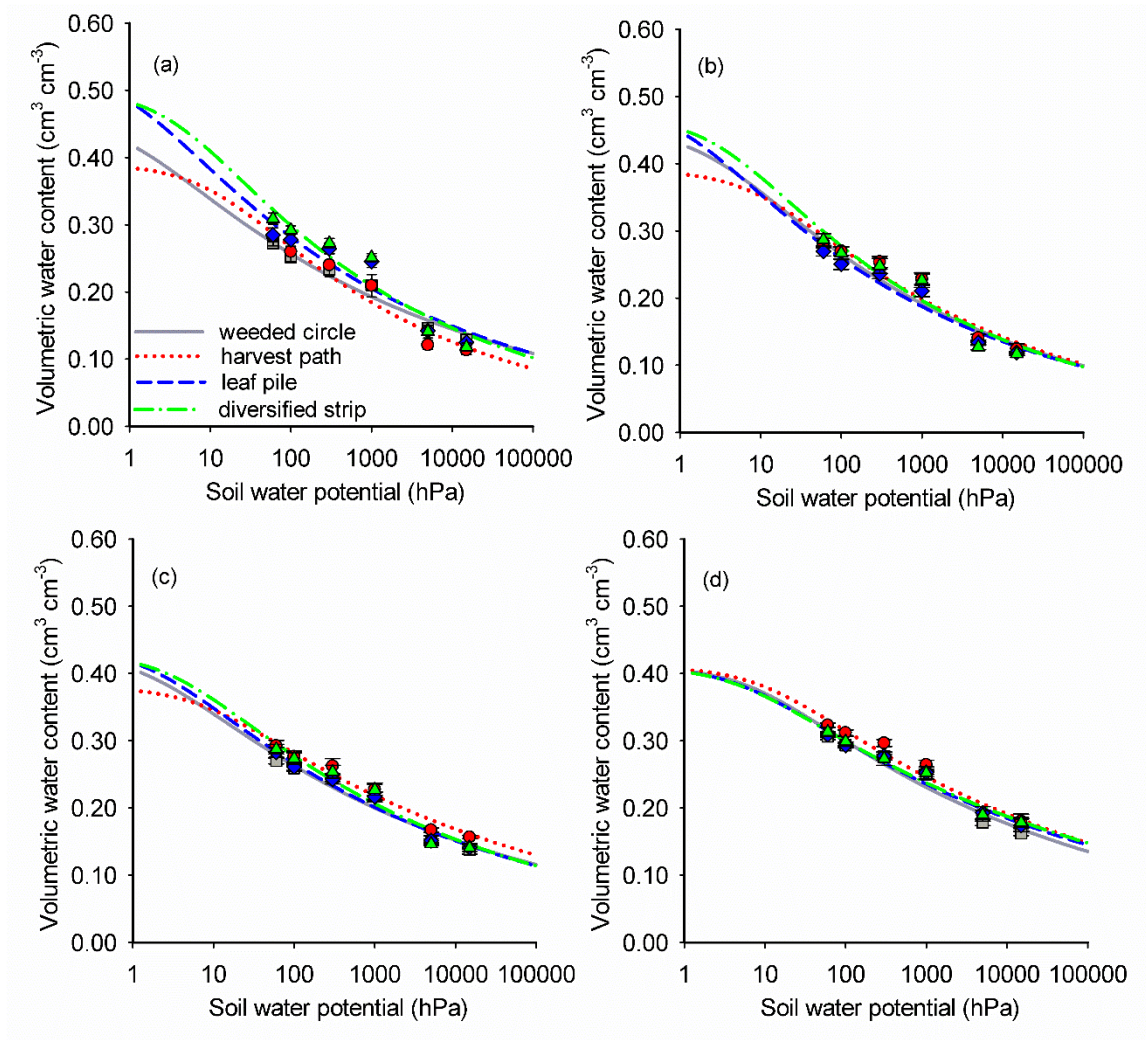
**Fig. 3** Soil density a, total porosity b, microporosity c, macroporosity d, field capacity e, permanent wilting point f, available water g, carbon h, weighted average diameter i, penetration resistance j, structural stability index k, and compaction degree l in the 0–5, 5–10, 10–20 and 20–30 cm soil layers in the harvest path (orange circle), leaf pile (blue diamond), weeded circle (red square), and diversified strip (green triangle) zones of oil palm agroforestry systems in Tomé-Açu, Eastern Amazon, Brazil.



**Fig. 4** Dimensions of the multivariate space of the soil physical properties in the a 0–5, b 5–10, c 10–20, and d 20–30-cm soil layers in the oil palm agroforestry systems in Tomé-Açu, Eastern Amazon, Brazil. Biplot illustrating the different soil management zones of the oil palm agroforestry system: orange circle (harvest path), red square (weeded circle), blue Diamond (leaf pile), and green triangle (diversified strip). AGGRE, weighted average soil aggregate diameter; AVAIL, soil available water; COMPA, soil compaction; FIELD, soil moisture at field capacity; MACPO, soil macroporosity; MICPO, soil microporosity; PENET, soil penetration resistance; SOILC, soil carbon content; SOILD, soil density; STRUC, soil structural stability index; TOTPO, soil total porosity; WILTI, soil moisture at permanent wilting point.



**Fig. 5** Water retention curves in the a 0–5, b 5–10, c 10–20, and (d) 20–30 cm soil layers in the weeded circle (gray square), harvest path (red circle), leaf pile (blue diamond), and diversified strip (green triangle) zones of oil palm agroforestry systems in Tomé-Açu, Eastern Amazon, Brazil.



**Table 3** Variation of soil variables (mean  $\pm$  standard deviation) among management zones in different soil layers in oil palm agroforestry systems in Tomé-Açu, Eastern Amazon, Brazil. Within a row, different letters indicate that means differ at  $p < 0.05$  (Tukey test). Significant F statistics and associated P-values are in bold letters.

Soil attributes	Management zones									Statistical parameters			
	Weeded circle			Harvest path			Diversified strip			Leaf pile			F-value
<i>0-5 cm depth</i>													
SOILD	1.36 $\pm$ 0.08	c	1.63 $\pm$ 0.09	A	1.28 $\pm$ 0.06	c	1.18 $\pm$ 0.05	b	<b>56.877</b>	<b>0.00000</b>			
TOTPO	0.47 $\pm$ 0.03	c	0.37 $\pm$ 0.04	A	0.51 $\pm$ 0.04	bc	0.53 $\pm$ 0.03	b	<b>38.928</b>	<b>0.00000</b>			
MICPO	0.27 $\pm$ 0.01	ab	0.28 $\pm$ 0.04	A	0.31 $\pm$ 0.03	b	0.29 $\pm$ 0.02	ab	<b>3.032</b>	<b>0.04575</b>			
MACPO	0.21 $\pm$ 0.03	b	0.09 $\pm$ 0.06	A	0.21 $\pm$ 0.06	b	0.25 $\pm$ 0.03	b	<b>17.230</b>	<b>0.00000</b>			
FIELD	0.25 $\pm$ 0.02	a	0.26 $\pm$ 0.05	A	0.29 $\pm$ 0.02	a	0.28 $\pm$ 0.03	a	2.669	0.06689			
WILTI	0.13 $\pm$ 0.02	a	0.11 $\pm$ 0.02	A	0.12 $\pm$ 0.02	a	0.13 $\pm$ 0.02	a	1.763	0.17720			
AVAIL	0.12 $\pm$ 0.02	ab	0.12 $\pm$ 0.02	A	0.17 $\pm$ 0.02	b	0.15 $\pm$ 0.03	ab	<b>3.590</b>	<b>0.02593</b>			
SOILC	22.34 $\pm$ 2.50	c	12.41 $\pm$ 1.77	A	22.49 $\pm$ 3.84	c	32.36 $\pm$ 11.24	b	<b>14.110</b>	<b>0.00001</b>			
AGGRE	5.30 $\pm$ 0.20	b	4.23 $\pm$ 1.05	A	5.45 $\pm$ 0.14	b	5.45 $\pm$ 0.21	b	<b>9.344</b>	<b>0.00019</b>			
PENET	1.34 $\pm$ 0.38	b	3.76 $\pm$ 0.81	A	0.95 $\pm$ 0.20	b	0.84 $\pm$ 0.24	b	<b>67.662</b>	<b>0.00000</b>			
STRUC	11.50 $\pm$ 0.82	c	7.43 $\pm$ 1.27	A	11.19 $\pm$ 2.38	c	14.83 $\pm$ 3.90	b	<b>12.676</b>	<b>0.00002</b>			
COMPA	76.21 $\pm$ 5.03	c	88.67 $\pm$ 5.26	A	72.37 $\pm$ 3.04	bc	68.86 $\pm$ 1.54	b	<b>36.978</b>	<b>0.00000</b>			
<i>5-10 cm depth</i>													
SOILD	1.42 $\pm$ 0.06	b	1.66 $\pm$ 0.04	A	1.34 $\pm$ 0.08	b	1.32 $\pm$ 0.13	b	<b>28.936</b>	<b>0.00000</b>			
TOTPO	0.47 $\pm$ 0.02	a	0.37 $\pm$ 0.02	B	0.46 $\pm$ 0.04	a	0.48 $\pm$ 0.05	a	<b>20.655</b>	<b>0.00000</b>			
MICPO	0.28 $\pm$ 0.09	ab	0.29 $\pm$ 0.01	A	0.29 $\pm$ 0.01	ab	0.27 $\pm$ 0.02	b	<b>4.275</b>	<b>0.01323</b>			
MACPO	0.19 $\pm$ 0.02	a	0.07 $\pm$ 0.03	B	0.18 $\pm$ 0.04	a	0.22 $\pm$ 0.05	a	<b>27.244</b>	<b>0.00000</b>			
FIELD	0.26 $\pm$ 0.02	a	0.27 $\pm$ 0.02	A	0.27 $\pm$ 0.03	a	0.25 $\pm$ 0.02	a	1.567	0.21947			
WILTI	0.12 $\pm$ 0.02	a	0.13 $\pm$ 0.02	a	0.11 $\pm$ 0.01	a	0.12 $\pm$ 0.01	a	1.052	0.38512			

AVAIL	0.14 ± 0.03	a	0.15 ± 0.02	a	0.15 ± 0.03	a	0.13 ± 0.02	a	0.812	0.49776
SOILC	18.86 ± 1.77	a	11.99 ± 1.63	c	14.76 ± 2.58	bc	15.85 ± 2.73	ab	<b>13.006</b>	<b>0.00002</b>
AGGRE	5.58 ± 0.12	a	4.38 ± 0.95	b	5.49 ± 0.11	a	5.61 ± 0.14	a	<b>11.847</b>	<b>0.00003</b>
PENET	2.24 ± 0.54	b	4.89 ± 0.70	a	1.39 ± 0.30	c	1.38 ± 0.21	c	<b>96.513</b>	<b>0.00000</b>
STRUC	8.79 ± 1.08	a	5.90 ± 1.14	c	6.97 ± 1.15	bc	7.82 ± 1.21	ab	<b>9.222</b>	<b>0.00021</b>
COMPA	79.99 ± 3.59	b	92.45 ± 2.64	a	74.65 ± 4.85	b	73.81 ± 7.33	b	<b>24.369</b>	<b>0.00000</b>
<i>10-20 cm depth</i>										
SOILD	1.51 ± 0.03	b	1.63 ± 0.04	a	1.50 ± 0.04	b	1.47 ± 0.01	b	<b>32.398</b>	<b>0.00000</b>
TOTPO	0.45 ± 0.04	a	0.36 ± 0.02	b	0.43 ± 0.02	a	0.43 ± 0.03	a	<b>13.516</b>	<b>0.00001</b>
MICPO	0.27 ± 0.06	b	0.30 ± 0.01	a	0.29 ± 0.01	a	0.28 ± 0.05	ab	<b>6.821</b>	<b>0.00136</b>
MACPO	0.18 ± 0.04	a	0.07 ± 0.02	b	0.14 ± 0.03	a	0.15 ± 0.05	a	<b>13.602</b>	<b>0.00001</b>
FIELD	0.26 ± 0.01	a	0.28 ± 0.02	a	0.27 ± 0.03	a	0.26 ± 0.02	a	1.322	0.28708
WILTI	0.14 ± 0.03	a	0.16 ± 0.02	a	0.14 ± 0.01	a	0.14 ± 0.02	a	1.962	0.14253
AVAIL	0.12 ± 0.02	a	0.11 ± 0.02	a	0.13 ± 0.03	a	0.12 ± 0.02	a	0.592	0.62553
SOILC	11.25 ± 1.73	a	9.34 ± 1.68	a	11.50 ± 2.66	a	12.30 ± 2.85	a	2.404	0.08855
AGGRE	4.85 ± 0.54	a	3.45 ± 0.82	b	5.18 ± 0.36	a	4.85 ± 0.45	a	<b>14.774</b>	<b>0.00001</b>
PENET	3.94 ± 0.96	b	5.76 ± 2.11	a	2.28 ± 0.39	c	2.59 ± 0.58	bc	<b>13.677</b>	<b>0.00001</b>
STRUC	4.76 ± 0.81	a	4.01 ± 0.95	a	4.90 ± 1.31	a	5.46 ± 1.16	a	2.469	0.08266
COMPA	85.12 ± 1.27	b	92.34 ± 3.41	a	85.07 ± 2.83	b	83.03 ± 2.04	b	<b>21.040</b>	<b>0.00000</b>
<i>20-30 cm depth</i>										
SOILD	1.50 ± 0.04	c	1.55 ± 0.03	ab	1.54 ± 0.04	bc	1.60 ± 0.04	a	<b>10.386</b>	<b>0.00009</b>
TOTPO	0.43 ± 0.02	a	0.41 ± 0.02	ab	0.42 ± 0.02	a	0.39 ± 0.03	b	<b>4.667</b>	<b>0.00911</b>
MICPO	0.30 ± 0.01	b	0.32 ± 0.01	a	0.30 ± 0.02	b	0.31 ± 0.01	ab	<b>4.915</b>	<b>0.00722</b>
MACPO	0.12 ± 0.02	a	0.09 ± 0.02	ab	0.12 ± 0.02	a	0.08 ± 0.03	b	<b>6.759</b>	<b>0.00143</b>
FIELD	0.30 ± 0.02	a	0.31 ± 0.01	a	0.30 ± 0.02	a	0.29 ± 0.01	a	2.189	0.11156
WILTI	0.16 ± 0.01	a	0.18 ± 0.04	a	0.18 ± 0.02	a	0.16 ± 0.03	a	1.070	0.37771
AVAIL	0.13 ± 0.02	a	0.13 ± 0.03	a	0.12 ± 0.02	a	0.12 ± 0.03	a	0.748	0.53246

SOILC	8.28 ± 0.83	a	7.663 ± 0.82	a	7.70 ± 1.39	a	9.335 ± 2.26	a	2.298	0.09916
AGGRE	4.06 ± 0.25	a	3.424 ± 0.61	a	3.96 ± 0.29	a	3.61 ± 0.67	a	<b>3.055</b>	<b>0.04471</b>
PENET	6.19 ± 1.63	ab	7.121 ± 2.46	a	2.89 ± 0.62	c	4.22 ± 1.30	bc	<b>10.846</b>	<b>0.00007</b>
STRUC	3.12 ± 0.45	a	2.721 ± 0.52	a	2.64 ± 0.54	a	3.40 ± 0.88	a	2.570	0.07427
COMPA	85.49 ± 2.93	b	89.516 ± 1.88	a	89.19 ± 3.17	a	92.71 ± 2.43	a	<b>9.955</b>	<b>0.00012</b>

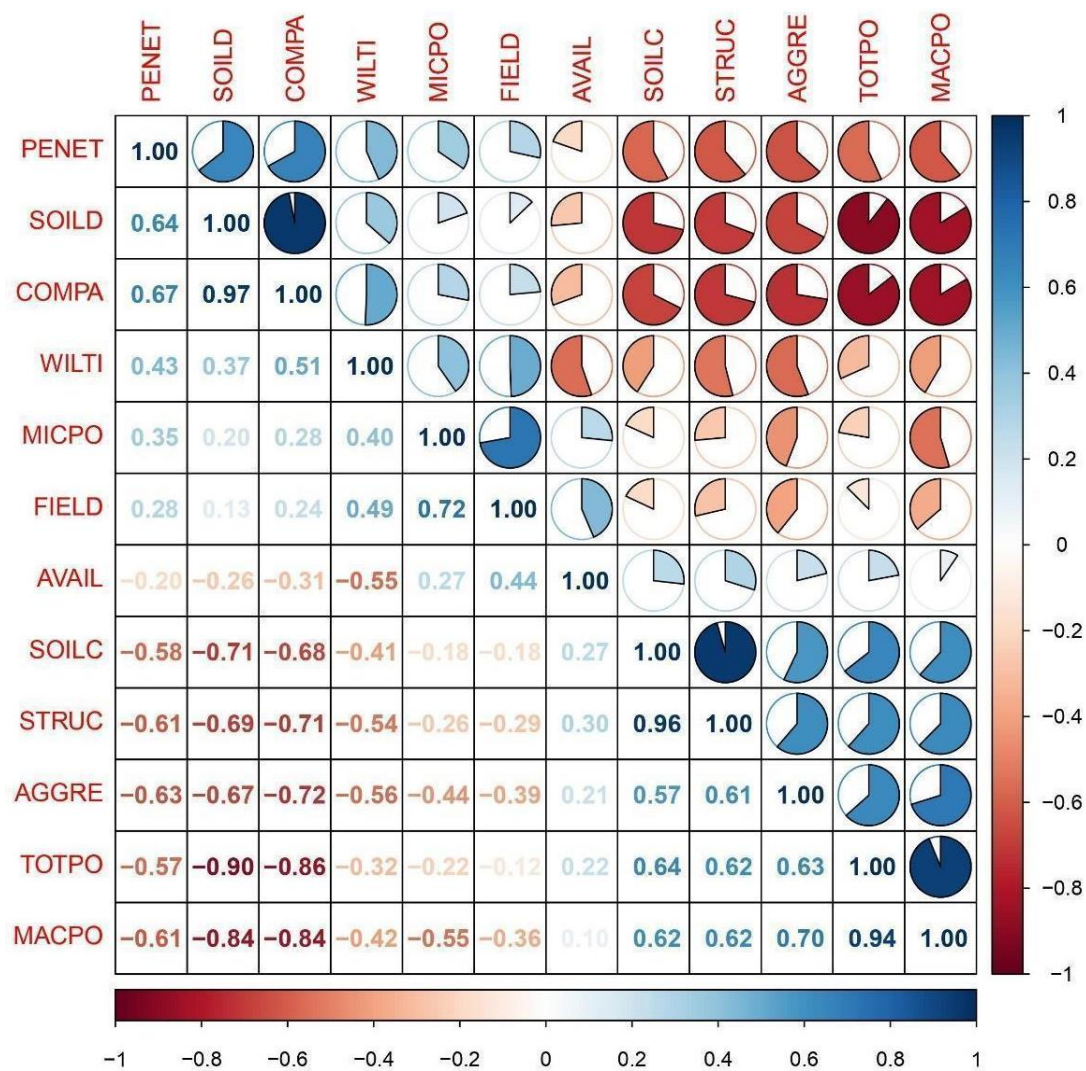
SOILD: Soil density ( $\text{g cm}^{-3}$ ); TOTPO: Total porosity ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ); MICPO: Microporosity ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ); MACPO: Macroporosity ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ); FIELD: Field capacity ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ); WILTI: Permanent wilting point ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ); AVAIL: Available water ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ); SOILC: Soil carbon ( $\text{g kg}^{-1}$ ); AGGRE: Aggregates mean weight diameter (mm); PENET: Resistance to penetration (MPa); STRUC: Stability structural index (%) and COMPA: Degree of compactness (%).

**Table 4** Parameters of the van Genuchten equation for the weeded circle, harvest path, leaf pile, and diversified strip zones of oil palm agroforestry systems in Tomé-Açu, Eastern Amazon, Brazil.  $\theta_r$  (residual water content);  $\theta_s$  (water content at saturation);  $\alpha$ , n, and m (equation-fitting parameters);  $R^2$  (coefficient of determination of the model) and RMSE (root mean square error).

Soil depth (cm)	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	N	m	$R^2$	RMSE
<b>Management zones</b>							
<b>weeded circle</b>							
0-5	0.000	0.460	1.072	1.125	0.111	0.993	0.074
5-10	0.000	0.450	0.396	1.143	0.125	0.969	0.007
10-20	0.001	0.430	0.617	1.119	0.107	0.985	0.004
20-30	0.001	0.410	0.139	1.117	0.105	0.977	0.004
<b>harvest path</b>							
0-5	0.001	0.390	0.087	1.168	0.144	0.972	0.006
5-10	0.001	0.390	0.102	1.146	0.128	0.961	0.006
10-20	0.000	0.380	0.131	1.113	0.102	0.987	0.003
20-30	0.001	0.410	0.099	1.111	0.100	0.973	0.005
<b>leaf pile</b>							
0-5	0.001	0.530	0.948	1.139	0.122	0.964	0.009
5-10	0.001	0.490	0.882	1.142	0.124	0.984	0.005
10-20	0.001	0.440	0.556	1.124	0.111	0.988	0.004
20-30	0.001	0.410	0.188	1.106	0.096	0.984	0.004
<b>diversified strip</b>							
0-5	0.000	0.500	0.260	1.157	0.135	0.967	0.008
5-10	0.001	0.470	0.303	1.153	0.133	0.973	0.007
10-20	0.001	0.430	0.283	1.130	0.115	0.981	0.005
20-30	0.001	0.410	0.203	1.103	0.093	0.991	0.003



**Fig. 6** Correlation matrix showing the results of the pairwise correlation analysis of soil properties in the oil palm agroforestry systems in Tomé-Açu, Eastern Amazon, Brazil. The size of the pie charts and the degree of coloring of each circle in the upper triangle are proportional to Pearson's correlation, according to the color legend at the bottom of the figure and the values in the lower triangle. AGGRE, weighted average soil aggregate diameter; AVAIL, soil available water; COMPA, soil compaction; FIELD, soil moisture at field capacity; MACPO, soil macroporosity; MICPO, soil microporosity; PENET, soil penetration resistance; SOILC, soil carbon content; SOILD, soil density; STRUC, soil structural stability index; TOTPO, soil total porosity; WILTI, soil moisture at permanent wilting point.





### **CAPÍTULO 3 - SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE ÓLEO MELHORAM A QUALIDADE FÍSICA E ESTOCAM MAIS CARBONO EM AGREGADOS DO SOLO DO QUE MONOCULTIVO NA AMAZÔNIA**

#### **RESUMO**

Os sistemas agroflorestais (SAFs) com palma de óleo apresentam maior potencial de melhorar a qualidade física e de estocar mais carbono em agregados do solo do que o sistema de monocultivo de dendê. No entanto, não se tem conhecimento de estudos na Amazônia, que compare esses sistemas de cultivos, quanto a melhoria da qualidade física e o estoque de carbono em agregados. Assim, os objetivos deste trabalho foram avaliar se SAFs com palma de óleo melhoram a qualidade física e se estocam mais carbono em frações de agregados do solo comparado ao monocultivo. Coletamos amostras indeformadas e deformadas do solo nas camadas 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm do solo nos sistemas agroflorestais e monocultivo com palma de óleo, a fim de determinarmos os atributos físicos e o carbono do solo. No laboratório determinamos a densidade do solo, porosidade total, umidade gravimétrica, estabilidade de agregados e teor de carbono em macro e microagregados do solo. A resistência à penetração determinamos em campo com um penetrômetro de impacto. Em geral, o SAF apresentou uma tendência de maior estabilidade de agregados, porosidade e menor densidade do solo comparado ao monocultivo nas camadas subsuperficiais do solo. No SAF provavelmente o maior acúmulo de serapilheira sobre o solo influenciou em maior umidade e, conseqüentemente, menor resistência à penetração do que o monocultivo. No geral, os sistemas de cultivo com palma de óleo armazenam mais carbono em macroagregados do que microagregados. O SAF apresentou maior potencial de armazenar carbono em macroagregados do solo do que o monocultivo. Na camada 0-30 cm do solo o SAF armazena mais carbono do que o monocultivo de dendê. Portanto, o cultivo de palma de óleo em sistemas agroflorestais apresenta maior potencial de armazenar mais carbono em agregados e de melhorar a qualidade física do solo no longo prazo do que o monocultivo de palma de óleo e, desta forma, contribuir na conservação do solo e mitigação das mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** Atributos físicos. Carbono do Solo. Macroagregados. Qualidade do solo.

#### **ABSTRACT**

Oil palm agroforestry systems (AFS) have greater potential to improve physical quality and store more carbon in soil aggregates than oil palm monoculture systems. However, there is no knowledge of studies in the Amazon that compare these cropping systems in terms of improving physical quality and carbon stock in aggregates. Thus, the objectives of this work were to evaluate whether oil palm AFS improve physical quality and store more carbon in soil aggregate fractions compared to monoculture. We collected undisturbed and deformed soil samples in the 0-10 cm, 10-20 cm and 20-30 cm soil depths in agroforestry and oil palm monoculture systems, in order to determine the physical attributes and soil carbon. In the laboratory we determined the soil density, total porosity, gravimetric moisture, aggregate stability and carbon content in soil macro and microaggregates. The penetration resistance was determined in the field with an impact penetrometer. In general, AFS showed a tendency towards greater aggregate stability, porosity and lower soil density compared to monoculture in subsurface soil depths. In the AFS, probably the greater accumulation of litter on the soil influenced in greater moisture and,

consequently, less resistance to penetration than the monoculture. Overall, oil palm cropping systems store more carbon in macroaggregates than microaggregates. The AFS showed greater potential to store carbon in soil macroaggregates than monoculture. In the 0-30 cm depth of soil, AFS stores more carbon than oil palm monoculture. Therefore, oil palm cultivation in agroforestry systems has greater potential to store more carbon in aggregates and to improve the physical quality of the soil in the long term than oil palm monoculture and, in this way, contribute to soil conservation and climate change mitigation.

**Keywords:** Macroaggregates. Physical attributes. Soil carbon. Soil quality.

### 3.1 Introdução

Nas últimas décadas, o aumento da demanda mundial por óleo de palma levou à expansão das plantações de palma de óleo (*Elaeis guineensis* jacq.) nos trópicos, como no sudeste asiático, principal região produtora do mundo, e também em países da África e América Latina (BENEZOLI et al., 2021; HANSEN et al., 2015; RAHMAN et al., 2021). No Brasil, o estado do Pará, na Amazônia brasileira, lidera a produção dessa *commodity* agrícola, sendo responsável por mais de 80% da produção nacional de óleo de palma e 90% da área cultivada (SEDAP, 2021).

A palma de óleo é cultivada tradicionalmente em sistemas de monocultivo. No entanto, sistemas diversificados, como os sistemas agroflorestais (SAFs), têm sido recomendados como uma alternativa ambientalmente sustentável ao monocultivo da palma de óleo na Amazônia (CARVALHO et al., 2014; GOMES et al., 2021). Os SAFs combinam árvores com espécies agrícolas, e/ou animais, e fornecem uma variedade de benefícios sociais, econômicos e ambientais (NAIR et al., 2009, 2010). No geral, SAFs que incluem práticas de manejo conservacionistas aumentam o teor de matéria orgânica e melhoram a qualidade física do solo, por meio da maior agregação das partículas minerais (HONTORIA et al., 2016; XIAO et al., 2020; ZHAO et al., 2018). Além disso, os SAFs aumentam o compartimento (*pool*) de carbono orgânico que fica protegido fisicamente no interior dos macroagregados (CHATTERJEE et al., 2020; HOBLEY et al., 2014; GAMA-RODRIGUES et al., 2010), ou seja, aqueles que contribuirão na formação dos microagregados (OADES, 1984; SIX et al., 2000).

Nos SAFs, o alto acúmulo de serapilheira sobre o solo e a alta diversidade de sistemas radiculares, geralmente característicos de sistemas que incluem árvores, podem aumentar os teores de carbono orgânico do solo. Em solos com alto teor de carbono ocorre aumento da estabilidade de agregados, porosidade e diminuição da densidade do solo e resistência à penetração, refletindo, portanto, em melhor qualidade física do solo (ASSIS et al., 2015;

POLANÍA-HINCAPIÉ et al., 2021). Nos SAFs em geral, ocorre a predominância de macroagregados do solo em detrimento aos microagregados (CHEN et al., 2017; GAMA RODRIGUES et al., 2010). Os macroagregados melhoram a qualidade física do solo (CHEN et al., 2017; SALTON et al., 2008; TISDALL e OADES, 1982), além de armazenar mais carbono do que agregados de menor diâmetro (AN et al., 2010; CHATTERJEE et al., 2020; OKOLO et al., 2020). Nos SAFs, quando se adota o manejo conservacionista, os microagregados permanecem preservados dentro dos macroagregado e assim, proporcionam maior proteção física do carbono (SIX et al., 2000). Logo, esses microagregados preservados tem fundamental importância na estabilização do carbono do solo. Assim, os SAFs comparados ao monocultivo provavelmente contribuirão para aumentar o armazenamento de carbono no interior dos agregados, favorecendo menor emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), para atmosfera.

Agropecuária é considerada como uma das principais fontes emissoras de gases de efeito estufa (IPCC, 2020). Globalmente, o setor agropecuário é responsável por aproximadamente 23% das emissões totais de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2020), que é o gás que mais contribui para o efeito estufa (SILVA-OLAYA et al., 2013). No solo, o CO<sub>2</sub> é produzido principalmente por raízes e microrganismos (PANOSSO et al., 2008). Os microrganismos produzem CO<sub>2</sub> durante a decomposição da matéria orgânica do solo, processo que pode ser acelerado quando ocorre rompimento dos agregados e, conseqüentemente, exposição do carbono intra-agregados à ação microbiana (GAO et al., 2017; ZHONG et al., 2017).

Nas últimas décadas, na Amazônia brasileira o aumento do desmatamento, queimadas e atividades agropecuárias, têm contribuído para aumentar as emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (GATTI et al., 2021). Diante do cenário de aumento nas emissões de CO<sub>2</sub>, degradação de terras e mudanças no clima, é premente a adoção de sistemas de produção agrícola que promovam a conservação dos recursos naturais na região Amazônica. Desse modo, comparado ao monocultivo, os SAFs apresentam maior potencial de armazenar carbono e, conseqüentemente, de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas (GAMA-RODRIGUES et al., 2010; RODRÍGUEZ et al., 2021).

Cultivos diversificados em geral, podem resultar em vantagens como um sistema de produção agrícola mais sustentável ambientalmente, frente às atuais mudanças climáticas. As vantagens podem resultar da melhoria da estrutura do solo e aumento da porosidade e retenção de água no solo (BORGES et al., 2019; GUSLI et al., 2020; NASIELSKI et al., 2015), assim como da maior estocagem de carbono em agregados (CHATTERJEE et al., 2020; MONROE et al., 2022). No entanto, estudos sobre a qualidade física do solo e o estoque de carbono em

diferentes frações de agregados, que comparem o cultivo de palma de óleo em SAFs e monocultivo, não foram ainda relatados na Amazônia. Um melhor entendimento sobre o impacto de cultivos de palma de óleo sobre a qualidade física e carbono do solo é importante para subsidiar a adoção de sistemas mais sustentáveis ambientalmente.

Assim, a nossa hipótese é de que a qualidade física do solo e o estoque de carbono em agregados é maior em SAFs com palma de óleo do que em monocultivo, porque os SAFs apresentam maior diversidade de espécies e geralmente maior aporte de matéria orgânica sobre o solo. Portanto, os objetivos deste trabalho foram avaliar se (a) SAFs com palma de óleo melhoram a qualidade física e se (b) estocam mais carbono em frações de agregados do solo comparado ao monocultivo.

## 3.2 Material e Métodos

### 3.2.1 Áreas de estudo

Conduzimos o estudo em cultivos de palma de óleo localizados em duas fazendas no município de Tomé-Açu, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. Na fazenda 1 (02° 40' 42" S, 48° 20' 45" W) avaliamos dois SAFs e na fazenda 2 (02° 31' 40" S, 48° 24' 57" W) um monocultivo (Figura 1). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Ami (ALVARES et al., 2013), com temperatura média anual de 26 °C e precipitação média anual de 2400 mm, e período mais chuvoso de dezembro a junho. O solo das áreas de estudo é classificado como Latossolo Amarelo Distrófico (SANTOS et al., 2018). A caracterização granulométrica e a fertilidade do solo dos cultivos são apresentadas na Tabela 1.

Os SAFs foram implantados em 2008 em área de pastagem degradada. Cada SAF ocupava 2 ha e eram formados por linhas duplas de palma de óleo (espaçamento de 7,5 m entre linhas e 9,0 m entre plantas), alternadas por faixas diversificadas (15 m de largura), constituída de espécies arbustivas e arbóreas. Os SAFs eram compostos por palma de óleo e outras espécies. Espécies arbustivas: *Acacia mangium*, *Bixa orellana*, *Piper nigrum*, *Theobroma cacao* e *Theobroma grandiflorum*; arbóreas: *Adenanthera pavonina*, *Artocarpus heterophyllus*, *Carapa guianensis*, *Cecropia peltata*, *Euterpe oleracea*, *Gliricídia sepium*, *Inga edulis*, *Lecythis pisonis*, *Mangifera indica*, *Platonia insignis*, *Spondias lutea* e *Swietenia macrophylla*.

O manejo dos SAFs se baseou principalmente na agricultura orgânica. Na área de coroamento da palma de óleo, ou seja, próximo ao estipe do dendezeiro, foram aplicados fertilizantes orgânicos e inorgânicos (Tabela 2 do Capítulo 2). As folhas de palma de óleo eram

podadas duas vezes ao ano e empilhadas ao lado do dendezeiro, entre a linha de palma de óleo e a faixa diversificada. A cada 15 dias, os cachos de palma de óleo colhidos foram transportados pelas entrelinhas da cultura (área conhecida como caminho da colheita) em carreta tracionada por um trator da marca New Holland de 75 CV. As áreas do caminho da colheita e de coroamento da palma de óleo foram roçadas três vezes ao ano com uma roçadeira acoplada ao trator. Em 2008, foram aplicados 10 kg planta<sup>-1</sup> de farinha de ossos e cama de frango e 40 kg planta<sup>-1</sup> de composto orgânico na faixa diversificada. As partes (folhas e galhos) da poda das espécies da faixa diversificada eram deixadas sobre o solo. Na faixa diversificada, a roçagem foi realizada manualmente.

O monocultivo de palma de óleo foi implantado em 2006, no mesmo espaçamento desta cultura nos SAFs. No plantio, foram aplicados 800 g de superfosfato triplo por cova. Em 2007, 200 g de ureia, 100 g de cloreto de potássio (KCl), 100 g de sulfato de magnésio (MgSO<sub>4</sub>), 13 g de bórax, e 8 g de fonte de micronutrientes (Zincop 101) foram aplicados por planta. A fertilização de manutenção foi realizada duas vezes por ano com 1.0 kg de NPK (13:11:21) por planta (GOMES et al., 2021).

### 3.2.2 Coleta de solo

Em 2018, delimitamos quatro parcelas de 30 x 30 m em cada SAF e no monocultivo para coleta das amostras de solo. Adotamos uma amostragem estratificada porque o manejo realizado em plantios de palma de óleo cria zonas que apresentam variação espacial distinta em atributos químicos, físicos e biológicos do solo (FRAZÃO et al., 2013; GOMES et al., 2021; HARON et al., 1998; RAMOS et al., 2018). Assim, no monocultivo amostramos em três zonas: (1) área de coroamento da palma de óleo, (2) caminho da colheita e (3) pilhas de folhas do dendezeiro. Nos sistemas agroflorestais, amostramos também na faixa diversificada. A área ocupada por cada zona de manejo nos SAFs e no monocultivo está descrita na Tabela 3.

Em cada zona coletamos: (a) três amostras indeformadas de solo em cilindros volumétricos (diâmetro: 5 cm, altura: 5 cm), (b) duas amostras na forma de monólitos (comprimento: 10 cm, largura: 10 cm, altura: 10 cm), em trincheiras e (c) coletamos também cinco amostras simples deformadas, para compor uma amostra composta deformada, com trado de aço. Coletamos as amostras indeformadas e deformadas nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm do solo; reunimos os resultados das amostras das camadas 0-5 e 5-10 cm, para representar a camada 0-10 cm do solo.

Nas trincheiras também coletamos monólitos para determinação de raízes finas (comprimento: 10 cm, largura: 10 cm, altura: 10 cm) e de raízes grossas (comprimento: 10 cm, largura: 30 cm, altura: 10 cm). Classificamos como raízes finas aquelas com diâmetro  $\leq 2,0$  mm e como grossas aquelas com diâmetro  $> 2,0$  mm.

### **3.2.3 Estabilidade de agregados do solo em água**

A determinação da estabilidade de agregados do solo foi adaptada de Yoder (1936) e Kemper e Rosenau (1986). Após secagem ao ar, destorroamos gentilmente os monólitos sobre peneira com abertura de malha de 8.0 mm para separar os agregados do solo. Colocamos duas amostras de 25 g de agregados (diâmetro menor do que 8.0 mm) sobre papel filtro em peneira de 4.0 mm; em seguida adicionamos água durante cinco minutos para umedecimento dos agregados por capilaridade (MADARI et al., 2005). Colocamos as amostras de agregados umedecidos em agitador de oscilação vertical para tamisação, abastecido com água, em velocidade constante de 30 rpm, por 15 minutos. Para o tamisamento a úmido, utilizamos um conjunto de sete peneiras com abertura de malha decrescente: 4.0 mm; 2.0 mm; 1.0 mm; 0.5 mm; 0.25 mm; 0.106 mm e 0.053 mm. Consideramos a fração macroagregados (agregados retidos nas peneiras igual ou maior que 0,25 mm) e microagregados (agregados de diâmetro menor que 0,25 mm) (OADES e WATERS, 1991).

Após o tamisamento a úmido, aplicamos um suave jato de água para transferir as amostras de agregados retidos em cada peneira para recipientes de alumínio. Em seguida, secamos as amostras de agregados em estufa de circulação forçada de ar a 40 °C por 48 h e determinamos a massa seca das amostras com balança semi-analítica com precisão de duas casas decimais. Finalmente, moemos as amostras de agregados a 100 mesh para determinação do teor de carbono das frações macro e microagregados.

### **3.2.4 Diâmetro médio ponderado dos agregados (AGGRE), densidade do solo (SOILD) e porosidade total do solo (TOTPO)**

Calculamos o diâmetro médio ponderado dos agregados (KEMPER e ROSENAU, 1986), a densidade do solo e a porosidade total do solo (TEIXEIRA et al., 2017) conforme as equações abaixo:

$$AGGRE = \sum_{i=1}^n x_i w_i / m_i$$

AGGRE: diâmetro médio ponderado dos agregados, em mm;  $x_i$ : diâmetro médio de cada classe de agregado, em mm;  $w_i$ : massa de cada classe de agregados, em g; e  $m_i$ : massa total de agregados, em g.

$$SOILD = \frac{ms}{v}$$

SOILD: densidade do solo, em  $\text{g cm}^{-3}$ ; ms: massa do solo seco em estufa a 105 °C, em g e v: volume da amostra, em  $\text{cm}^{-3}$ .

$$TOTPO = 1 - \left( \frac{SOILD}{PARTD} \right)$$

TOTPO: porosidade total do solo, em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ; SOILD: densidade do solo, em  $\text{g cm}^{-3}$  e PARTD: densidade de partículas ( $2.65 \text{ g cm}^{-3}$ ).

### 3.2.5 Resistência à penetração (PENET) e umidade gravimétrica do solo (MOIST)

Usamos um penetrômetro (modelo STOLF, KAMAK, Brasil) com um ângulo do cone de 30° para determinar a resistência do solo à penetração. Os resultados obtidos em impactos  $\text{dm}^{-1}$  foram transformados em resistência mecânica (MPa), usando a equação proposta por Stolf et al. (2014):

$$PENET \text{ (MPa)} = 5.6 + 6.89 \times N \text{ (impactos } \text{dm}^{-1}) \times 0.1$$

PENET: resistência do solo à penetração, em MPa e N: é 10 x n° de impactos dividido pela penetração do cone, em cm.

Para determinação da umidade gravimétrica (TEIXEIRA et al., 2017), coletamos amostras deformadas de solo com trado sonda, especificamente próximo dos locais em que medimos a resistência à penetração.

### 3.2.6 Estoque de carbono do solo

Determinamos o teor de carbono das frações macro e microagregados do solo por combustão via seca (Vario MACRO cube elemental analyzer, Langensfeld, Germany). O estoque de carbono calculamos de acordo com Chatterjee et al. (2020).

$$\text{Estoque de C} = \text{C} \times \text{SOILD} \times \text{prof} \times \text{peso da fração}$$

Estoque de C: estoque de carbono, em Mg ha<sup>-1</sup>; C: teor de carbono, em g 100 g<sup>-1</sup>; SOILD: densidade do solo, em g cm<sup>-3</sup>; Prof: profundidade do solo, em cm; e peso da fração: massa de agregados pela massa de solo total (adimensional).

### 3.2.7 Biomassa de raízes

Os monólitos de solos foram mantidos em refrigeração (aproximadamente 4° C) até serem lavados com água corrente sobre um jogo de peneiras de 2 mm para separar as raízes. Secamos as raízes em estufa a 65 °C por 72 h e as pesamos em balança com precisão de 0,0001g.

### 3.2.8 Análise estatística

Utilizamos modelos lineares de efeitos mistos (LMMs) para testar os efeitos dos diferentes sistemas de produção de palma de óleo (sistema agroflorestal e monocultivo) sobre os atributos físicos do solo e o estoque de carbono do solo e de raízes (CRAWLEY, 2013; ZUUR et al., 2009). Os LMMs são os mais apropriados e robustos para modelos aninhados como o nosso design amostral (SCHIELZETH e NAKAGAWA, 2013) e variáveis respostas: densidade do solo, porosidade total, resistência à penetração, umidade gravimétrica, diâmetro médio ponderado dos agregados, relação C:N em macro e microagregados, estoque de carbono em macro, microagregados e total, e estoque de raízes. Utilizamos a função lmer do pacote lme4 para a criação do modelo linear misto (BATES et al., 2015) e a função Anova do pacote car para testar a significância por meio do teste Type II Wald Chi-square. Utilizamos a correlação de Pearson para testar a correlação entre as variáveis. Todos os procedimentos estatísticos foram conduzidos no *software* estatístico R v.4.1.2 (R CORE TEAM, 2021).



### **3.3 Resultados**

#### **3.3.1 Atributos físicos e estoque de raízes do solo**

Os sistemas de cultivo de palma de óleo (sistema agroflorestal e monocultivo) não afetaram a densidade, a porosidade total e a estabilidade de agregados do solo (Figuras 2A, B e C). A resistência do solo à penetração foi mais alta no monocultivo do que no SAF nas camadas 0-10 e 10-20 cm do solo; não houve diferença entre os sistemas na camada 20-30 cm (Figura 2D). O SAF apresentou maior umidade do solo do que o monocultivo em todas as camadas do solo (Figura 2E). O estoque de raízes foi maior no SAF do que no monocultivo nas camadas 0-10 e 10-20 cm; não houve diferença entre os sistemas na camada 20-30 cm (Figura 2F).

#### **3.3.2 Estoque de carbono nas frações de agregados do solo**

No geral, o teor e o estoque de carbono em macroagregados do solo foi maior no SAF do que no monocultivo nas camadas 0-10 e 10-20 cm (Figuras 3A e 3C). O teor de carbono em microagregados do solo foi maior no SAF do que no monocultivo na camada 0-10 cm; na camada 10-20 e 20-30 cm não houve diferença entre os sistemas (Figura 3B). O estoque de carbono em microagregados foi maior no SAF na camada 0-10 cm e maior no monocultivo na camada 20-30 cm. Na camada 10-20 cm não houve diferença entre os sistemas (Figura 3D). A relação C:N dos macroagregados do solo foi maior no SAF do que no monocultivo na camada 0-10 cm; nas outras camadas não houve diferença entre sistemas (Figura 4A). A relação C:N dos microagregados do solo não variou entre sistemas de cultivo (Figura 4B).

Na camada 0-30 cm do solo, o estoque de carbono em macroagregados foi maior no SAF do que no monocultivo (Figura 5A), mas o estoque de carbono em microagregados não diferiu entre os sistemas de cultivo (Figura 5B). O estoque de carbono total (soma de macroagregados e microagregados) do solo do SAF ( $38.08 \pm 0.14 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) foi superior ao do monocultivo ( $31.79 \pm 1.23 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) na camada 0-30 cm do solo (Figura 5C).

#### **3.3.3 Correlação entre variáveis do solo**

Na camada 0-10 cm, a densidade do solo se relacionou de forma negativa com a porosidade total; a resistência à penetração se relacionou negativamente com umidade do solo,

teor de carbono em microagregados e raízes; a umidade do solo se relacionou positivamente com teor de carbono em macro e microagregados e raízes; o teor de carbono em macroagregados se relacionou de forma positiva com o C:N macro; o carbono em microagregados de forma positiva com C:N macro e raízes (Figura 6).

Na camada 10-20 cm, a densidade do solo se relacionou de forma negativa com a porosidade total, teor de carbono em microagregados, estabilidade de agregados e raízes; a porosidade total se relacionou de forma positiva com carbono micro e agregados; a resistência do solo à penetração se relacionou de forma negativa com a umidade do solo; carbono macro e carbono micro estão relacionados de forma positiva com C:N macro (Figura 6).

Por fim, na camada 20-30 cm, a densidade do solo se relacionou de forma negativa com a porosidade total e raízes; a porosidade total se relacionou de forma positiva com carbono macro e raízes; enquanto que a resistência à penetração se relacionou de forma negativa com essas duas variáveis; a umidade se relacionou de forma negativa com teor de carbono micro; carbono macro se relacionou de forma positiva com estabilidade de agregados, C:N macro e raízes; e a estabilidade de agregados se relacionou de forma positiva com raízes (Figura 6).

### **3.4 Discussão**

#### **3.4.1 Atributos físicos do solo**

No geral, confirmamos a hipótese de melhoria dos atributos físico-hídricos do solo (estabilidade de agregados, densidade do solo, porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração) no SAF com palma de óleo comparado ao monocultivo. Confirmamos a hipótese de que o SAF estoca mais carbono em agregados do solo do que o monocultivo. Tomados em conjunto, nossos resultados demonstram que o cultivo da palma de óleo em SAFs apresenta maior potencial de melhorar a qualidade do solo do que o monocultivo.

Em geral, esperávamos que a estabilidade de agregados e a porosidade total fossem maiores e a densidade do solo fosse menor no SAF do que no monocultivo. No entanto, esses atributos do solo não diferiram entre os sistemas de cultivo, embora a porosidade e a estabilidade de agregados tenham sido ligeiramente mais elevados e a densidade do solo menor no SAF do que no monocultivo, principalmente nas camadas subsuperficiais do solo. Essas tendências no SAF podem ter sido influenciadas pela entrada de carbono proveniente das raízes. No SAF, os diferentes sistemas radiculares (em termos de morfologia, arquitetura e associação com microrganismos) promovem a entrada de matéria orgânica em função da ciclagem das

raízes podendo melhorar a qualidade física do solo por meio da agregação em camadas mais profundas, devido a presença de espécies arbóreas, que geralmente apresentam sistema radicular profundo (CHEN et al., 2017; FATTET et al., 2011; SALTON et al., 2008). Além disso, as raízes das plantas liberam exsudados orgânicos que atuam como agentes de ligação e exercem papel fundamental no processo de agregação das partículas minerais (TISDAL e OADES, 1982; XIAO et al., 2020).

No SAF, uma alta frequência de espécies que produzem e acumulam grandes quantidades de serapilheira sobre o solo, como *T. cacao*, pode favorecer o aporte de carbono orgânico e, conseqüentemente, melhorar a agregação do solo. No geral, há uma forte relação entre teor de carbono e estabilidade de agregados (Figura 5), pois o carbono orgânico do solo influencia positivamente a formação e estabilização dos agregados (CASTRO FILHO et al., 2002; SALTON et al., 2008; TISDAL e OADES, 1982).

Acreditamos que o teor de carbono do solo no monocultivo proveniente das raízes da palma de óleo e do empilhamento das folhas da cultura (FRAZÃO et al., 2013, 2014) foi o principal fator que contribuiu para manter a estabilidade de agregados, a porosidade total e a densidade do solo em níveis semelhantes ao do SAF, principalmente na camada superficial (0-10 cm) (Figuras 2A, B e C). Apesar do teor de carbono do solo ter sido maior no SAF do que no monocultivo (Figura 3), isso não refletiu em diferenças significativas dos atributos (estabilidade de agregados, porosidade total e densidade do solo) entre os sistemas de cultivo de palma de óleo. Outros estudos sobre sistemas agroflorestais têm demonstrado o potencial desses sistemas de cultivo em melhorar os atributos físicos do solo em relação ao monocultivo (CHEN et al., 2017; PEZARICO et al., 2013). Em geral, como os SAFs apresentam maior diversidade de espécies e aporte de matéria orgânica acima e abaixo do solo do que o monocultivo, seu potencial de melhorar a qualidade física do solo em longo prazo é maior do que a do monocultivo (LOZANO OLIVÉRIO et al., 2021; PEZARICO et al., 2013; SILVA et al., 2020).

Em nosso estudo, o solo mais úmido no SAF (Figura 2E) foi o principal fator que influenciou para menor resistência à penetração em todas as camadas do solo e os valores de resistência ficaram abaixo do limite crítico de 2 MPa (GABRIEL et al., 2021; TAYLOR et al., 1966; TORMENA et al., 1998). No monocultivo o solo mais seco contribuiu para que a resistência do solo à penetração superasse o limite crítico para o crescimento de raízes, principalmente na camada 10-20 cm (Figura 2D).

A maior umidade do solo no SAF em comparação ao monocultivo se deve provavelmente a efeitos diretos e indiretos da maior camada de serapilheira naquele sistema formada

principalmente por material vegetal da espécie *T. cacao*. Nos SAFs é comum o maior acúmulo de resíduos vegetais (serapilheira), com efeitos diretos como barreira física, que reduz a evaporação e aumenta a infiltração e a capacidade de retenção de água no solo comparado ao monocultivo (NIETHER et al., 2017; THOMAZINI et al., 2015). De forma indireta, a serapilheira promove o aumento do teor de carbono orgânico do solo, que conseqüentemente contribui para reter água no solo (NIETHER et al., 2017; SILVA et al., 2020).

A menor resistência do solo à penetração em SAFs provavelmente resulta do aporte contínuo de serapilheira, que promove maior umidade do solo e, conseqüentemente, menor resistência à penetração (COUTO et al., 2016; FREITAS et al., 2012; SILVA CHAVES et al., 2020). A presença de árvores de sombra, cobertura permanente do solo com serapilheira e altos teores de carbono, que são comuns em SAFs biodiversos como o do nosso estudo, contribuem para reduzir a perda de água da superfície do solo por evaporação (GUSLI et al., 2020; NIETHER et al., 2017) e, dessa maneira, mantêm o solo úmido. Nossos resultados sugerem que a umidade do solo, carbono e as raízes foram os principais fatores que influenciaram na diferença da resistência do solo à penetração entre os sistemas estudados (Figura 6), mas outros fatores como textura, densidade e teor de matéria orgânica do solo podem ser afetados pelo tipo de sistema de produção e manejo do solo e, conseqüentemente, podem influenciar também na resistência à penetração (GABRIEL et al., 2021; VAZ et al., 2011).

### **3.4.2 Estoque de carbono em frações de agregados do solo**

O maior estoque de carbono nas frações de agregados do SAF comparado ao monocultivo deve estar relacionada ao maior aporte de matéria orgânica desse sistema. No SAF, há várias fontes de aporte de matéria orgânica relacionadas à estrutura da vegetação (parte aérea, raízes, serapilheira; por exemplo, o aporte de matéria orgânica via parte aérea (*litterfall*) e estas são marcadamente mais expressivas e mais bem distribuídas ao longo do ano do que no monocultivo, promovendo uma cobertura permanente naquele sistema de cultivo). No monocultivo, a queda natural de folhas é negligível e o aporte de matéria orgânica depende principalmente dos episódios de poda, que concentram a matéria orgânica em uma faixa restrita do plantio (empilhamento). Além das diferenças na parte aérea, os SAFs estudados apresentam maior estoque de raízes do que o monocultivo (Figura 2E). Então, o maior estoque de carbono em macroagregados no SAF em relação ao monocultivo deve ter sido influenciado em parte por essas características estruturais (parte aérea e raízes) particulares dos SAFs, como relatado

em outros estudos (CHATTERJEE et al., 2020; CHEN et al., 2017; GAMA RODRIGUES et al., 2010).

Outra fonte de matéria orgânica no SAF provém do manejo da adubação orgânica. No SAF foram aplicados cachos vazios de frutos, torta de palma de óleo, torta de mamona e compostos orgânicos de origem animal e vegetal, além de outros adubos orgânicos (Tabela 2 do capítulo 2). O manejo da adubação orgânica no SAF é considerada uma fonte externa de carbono para o solo. Logo, o manejo orgânico provavelmente contribuiu também para o maior estoque de carbono nas frações de agregados do SAF comparado ao monocultivo, que não recebeu adubação orgânica.

Em nosso estudo, o estoque de carbono foi maior nos macroagregados do que nos microagregados (Figura 3), consistente com outros estudos em SAFs (CHATTERJEE et al., 2020; GAMA RODRIGUES et al., 2010; MONROE et al., 2022). Em SAFs em que há poucos distúrbios, a permanência do carbono contido em macroagregados por longa duração é favorecida, como demonstrado em SAFs de cacau no Sul da Bahia, Brasil. Considerando o baixo nível de distúrbios que o solo sofre em SAFs de cacau ou geralmente sofrem pouco distúrbio, o que permite a permanência mais longa do carbono contido em macroagregados do solo (GAMA RODRIGUES et al., 2010; MONROE et al., 2022). Em SAFs em que há pouco ou nenhum revolvimento do solo, como na nossa área experimental, possivelmente há menor exposição do carbono contido no interior dos agregados à decomposição microbiana (GAO et al., 2017; ZHONG et al., 2017), favorecendo assim, o acúmulo do carbono nos agregados.

O carbono contido nos macroagregados do solo no SAF com palma de óleo parece ser mais estável do que no monocultivo de palma de óleo, por apresentar maior relação carbono/nitrogênio (C:N), principalmente na camada 0-10 cm daquele sistema de cultivo (Figura 4). Sugerimos que o acúmulo de serapilheira sobre o solo proveniente principalmente da espécie *T. cacao* influenciou na maior relação C:N (BAI et al., 2022; ROJAS et al., 2017). Resíduos com alta relação C:N como os de cacau, apresentam decomposição lenta e, conseqüentemente, maior impacto de longo prazo no armazenamento de carbono (BLANCO-CANQUI e LAL, 2004). A maior relação C:N (em macroagregados) encontrada geralmente em SAFs do que em monocultivos é atribuída a maior diversidade de resíduos vegetais aportados sobre o solo, provenientes das diferentes espécies que compõem os SAFs. Por exemplo, SAFs com *Hevea brasiliensis* (seringueira) disponibilizam resíduos vegetais com relação C:N mais elevados do que monocultivo com seringueira (CHEN et al., 2017), o que favorece a decomposição mais lenta da matéria orgânica.

Agentes de agregação do solo mais persistentes (raízes grossas e frações de ácido húmico) e temporários (raízes finas e hifas micorrízicas) são significativamente aumentados em solos de SAFs do que no de monocultivos (CHEN et al., 2017). De fato, um estudo recente na Amazônia Oriental demonstrou que a palma de óleo cultivada em SAFs apresenta três vezes mais colonização micorrízica do que em monocultivo, o que pode estar relacionado a maior diversidade de espécies e o manejo da adubação orgânica empregado nos SAFs (SILVA MAIA et al., 2021). Portanto, a maior presença de agentes persistentes e temporários no solo do SAF com palma de óleo pode favorecer a agregação, o que deve resultar em maior proteção física do carbono (CHEN et al., 2017; TISDAL e OADES, 1982).

A relação C:N nas frações de agregados do solo variou de 6,0 a 11,0 nos cultivos de palma de óleo, próximos aos valores de 7,5 a 9,5 em ecossistemas com temperaturas elevadas (CHEN et al., 2017). A faixa de valores de relação C/N encontrados favorece a decomposição da matéria orgânica (ou resíduos vegetais) (AN et al., 2010). Além disso, na Amazônia o clima é caracterizado por temperaturas elevadas, assim como precipitação e umidade altas, durante a maior parte do ano (ALVARES et al., 2013; SOUZA et al., 2009); essas condições climáticas são propícias para acelerar a decomposição dos resíduos vegetais. Dessa forma, as condições de qualidade de material vegetal e climáticas são favoráveis à decomposição nas nossas áreas experimentais.

Na camada 0-30 cm do solo, o estoque total de carbono no SAF foi maior do que no monocultivo em ambas as frações de agregados e também quando somadas as frações (macroagregados + microagregados), consistente com o esperado potencial de SAFs com palma de óleo em estocar mais carbono do que o monocultivo (GOMES et al., 2021). Nas condições de solo e clima desse estudo, o cultivo do dendezeiro com espécies frutíferas, espécies florestais e leguminosas, associado ao uso de adubos orgânicos levam a um maior armazenamento de carbono em frações de agregados do solo do que no monocultivo de palma de óleo. Sugerimos que o maior estoque de carbono no SAF se deve a aspectos inerentes a (a) estrutura e composição da vegetação (aporte contínuo de serapilheira sobre o solo e maior estoque de raízes) e (b) manejo (adubação orgânica). No SAF, as diferentes espécies vegetais aportam ao solo resíduos (serapilheira), que combinado ao manejo da poda e à ciclagem constante do material vegetal são o diferencial para que os SAFs em geral, tenham maior potencial de estocar carbono no solo do que o monocultivo. No SAF estudado, provavelmente as melhores condições de temperatura e umidade favorável para a ciclagem da matéria orgânica, crescimento de raízes e microrganismos é proporcionado pela cobertura permanente do solo

com serapilheira o que deve ter favorecido o armazenamento de carbono no solo (HARON et al., 1998; RODRÍGUEZ et al., 2021; RÜEGG et al., 2019).

O manejo da adubação orgânica no SAF pode ter favorecido o armazenamento de carbono nos agregados comparado ao monocultivo. No nosso estudo, o manejo orgânico representa uma fonte adicional externa de carbono para o SAF com palma de óleo. Em geral, os estudos apontam que o teor de carbono no solo em sistemas agrícolas manejados organicamente é maior do que aqueles sistemas manejados de modo convencional, o que aumenta o potencial de armazenamento de carbono no solo nos sistemas orgânicos (SCHJONNING et al., 2002; SU et al., 2006; TRIBERTI et al., 2008). Os SAFs baseados em palma de óleo jovens (2,5 anos de idade), em áreas experimentais semelhantes ao do nosso estudo já indicavam alto nível de acúmulo líquido inicial de carbono do solo, que provavelmente refletiu a combinação de preparo da área livre de fogo, fertilização orgânica e entrada de resíduos de plantas do manejo da poda e da remoção de ervas espontâneas (CARVALHO et al., 2014).

Encontramos resultados que validam os benefícios ecológicos já apresentados por sistemas agroflorestais com palma de óleo, na nossa área experimental (RAMOS et al., 2018) como em outras áreas experimentais (CARVALHO et al., 2014; GOMES et al., 2021; SILVA MAIA et al., 2021) no estado do Pará. Contudo, nosso estudo tem limitações que não permite separar o efeito dos sistemas de cultivo (sistema agroflorestal e monocultivo) e da fertilização (orgânica e química) sobre a qualidade física e o carbono do solo. Portanto, sugerimos a condução de estudos futuros que controlem os fatores sistema de cultivo e tipo de adubação para um melhor entendimento do funcionamento do SAF com palma de óleo.

### **3.5 Conclusões**

O sistema agroflorestal com palma de óleo comparado ao monocultivo melhorou a qualidade física do solo, proporcionando maior retenção de umidade e menor resistência do solo à penetração.

Os sistemas de cultivo de palma de óleo estocaram mais carbono em macroagregados do que em microagregados. O sistema agroflorestal apresentou maior potencial de armazenar carbono nas frações de agregados do que o monocultivo.

Portanto, o cultivo de palma de óleo em sistemas agroflorestais é uma alternativa de agricultura com menor impacto ambiental para os produtores de palma de óleo na Amazônia, devido ao seu potencial de armazenar mais carbono em agregados do que o monocultivo de

palma de óleo e, desta forma, contribuir na conservação do solo e mitigação das mudanças climáticas.

### **Agradecimentos**

Agradecemos aos agricultores que contribuíram para realização desta pesquisa. Ao projeto SAF Dendê: “Conciliando conservação com meios de vida”, resultado da parceria entre Cooperativa Agrícola Mista de Tomé-Açu (CAMTA), Natura Inovação e Tecnologia de Produtos-Ltda, Embrapa Amazônia Oriental (CPATU), Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal (ICRAF), e financiado pela Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional (USAID). À Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Estado do Pará (FAPESPA) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudo a RLLO e de bolsa de produtividade em pesquisa a SSV (processo N° 312038/2015), respectivamente.

### **REFERÊNCIAS**

ALVARES, C. A. et al. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AN, S. et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. **Catena**, v.81, n.3, p.226-233, 2010.

ANDRADE BONETTI, J. et al. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of na Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 86, p. 280-291, 2019.

ASSIS, P. C. R et al. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária floresta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 309-316, 2015.

BAI, S. H. et al. Leaf litter species affects decomposition rate and nutrient release in a cocoa plantation. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 324, p. 1-7, 2022.



BATES, D. et al. Fitting linear mixed effects models using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, 1-48, 2015.

BENEZOLI, V. H. et al. Modeling oil palm crop for Brazilian climate conditions. **Agricultural Systems**, v. 190, p. 103-130, 2021.

BLAINSKI, E. et al. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 975-983, 2008.

BLANCO-CANQUI, H., LAL, R. (2004). Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. **Critical reviews in plant sciences**, v. 23, p. 481-504, 2004.

BORGES, W. L. B. et al. Impact of crop livestock-forest integration on soil quality. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 6, p. 2111-2119, 2019.

CARVALHO, W. R. et al. Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm based agroforestry systems in the eastern Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 88, n. 2, p. 357-368, 2014.

CASTRO FILHO, C. et al. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 65, n. 1, p. 45-51, 2002.

CHATTERJEE, N. et al. Depth-wise distribution of soil-carbon stock in aggregate-sized fractions under shaded-perennial agroforestry systems in the Western Ghats of Karnataka, India. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 2, p. 341-358, 2020.

CHEN, C. et al. Effects of rubber-based agroforestry systems on soil aggregation and associated soil organic carbon: Implications for land use. **Geoderma**, v. 299, p. 13-24, 2017.

CHEN, Y. et al. Rotation and organic fertilizers stabilize soil water-stable aggregates and their associated carbon and nitrogen in flue-cured tobacco production. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 1, p. 192-205, 2020.

COUTO, W. H. et al. Atributos edáficos e resistência a penetração em áreas de sistemas agroflorestais no sudoeste amazônico. **Ciência Florestal**, v. 26, p. 811-823, 2016.

Crawley, M. J. (2013). *The R book*. Oxford: Wiley.

DA SILVA, Geny Rocha; PAULETTO, Daniela; SILVA, Arystides Resende. Dinâmica sazonal de nutrientes e atributos físicos do solo em sistemas agroflorestais. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 63, 2020.

FATTET, M. et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength. **Catena**, v. 87, n. 1, p. 60-69, 2011.

FRAZÃO, L. A. et al. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 4, p. 384-390, 2013.

FRAZÃO, L. A. et al. Soil carbon stocks under oil palm plantations in Bahia State, Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 62, p. 1-7, 2014.

FREITAS, I. C. et al. Resistência à penetração em Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes formas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 1275-1281, 2012.

GABRIEL, J. L. et al. Cover crops reduce soil resistance to penetration by preserving soil surface water content. **Geoderma**, v. 386, p. 1-8, 2021.

GAMA-RODRIGUES, E. F. et al. Carbon storage in soil size fractions under two cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. **Environmental Management**, v. 45, n. 2, p. 274-283, 2010.

GAO, L. et al. Effect of different tillage systems on aggregate structure and inner distribution of organic carbon. **Geoderma**, v. 288, p. 97-104, 2017.

GATTI, L. V. et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, v. 595, n. 7867, p. 388-393, 2021.

GOMES, M. F. et al. Oil palm agroforestry shows higher soil permanganate oxidizable carbon than monoculture plantations in Eastern Amazonia. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 15, p. 4313-4326, 2021.

GUSLI, S. et al. Soil organic matter, mitigation of and adaptation to climate change in cocoa-based agroforestry systems. **Land**, v. 9, n. 9, p. 1-18, 2020.

HANSEN, S. B. et al. Trends in global palm oil sustainability research. **Journal of Cleaner Production**, v. 100, n. 1, p. 140-149, 2015.

HARON, K. et al. Microbial biomass and soil organic matter dynamics in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantations, West Malaysia. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 30, n. 5, p. 547-552, 1998.

HOBLEY, E. et al. Stability and storage of soil organic carbon in a heavy-textured Karst soil from south-eastern Australia. **Soil research**, v. 52, n. 5, p. 476-482, 2014.

HONTORIA, C. et al. Aggregate size distribution and associated organic C and N under different tillage systems and Ca-amendment in a degraded Ultisol. **Soil and Tillage Research**, v. 160, p. 42-52, 2016.

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. **An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM\\_Updated-Jan20.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf)>.

Acesso em: 07 de set. 2021.

JOURDAN, C.; REY H. Architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. **Plant Soil**, v. 189, p. 33-48, 1997.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison, WI, 1986. p. 425-442. Part I.

LOZANO OLIVÉRIO, G. et al. Water Infiltration, Resistance to Penetration and Soil Moisture in Integrated Agricultural Yield Systems over Time. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 53, p. 1-10, 2021.

MADARI, B. et al. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 80, n. 1-2, p. 185-200, 2005.

MONROE, P. H. M. et al. Carbon and Nitrogen Occluded in Soil Aggregates Under Cacao-Based Agroforestry Systems in Southern Bahia, Brazil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p. v. 1, p. 1-14, 2022.

NAIR, P. K. R. et al. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. **Journal of plant nutrition and soil science**, v. 172, n. 1, p. 10-23, 2009.

Nair, P. K. R. et al. Carbon sequestration in agroforestry systems. **Advances in Agronomy**, v. 108, p. 237-307, 2010.

NASIELSKI, J. et al. Agroforestry promotes soybean yield stability and N<sub>2</sub>-fixation under water stress. **Agronomy for sustainable development**, v. 35, n. 4, p. 1541-1549, 2015.

NIETHER, W. et al. Spatial-temporal soil moisture dynamics under different cocoa production systems. **Catena**, v. 158, p. 340-349, 2017.

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

OADES, J. M.; WATERS, A. G. Hierarquia agregada em solos. **Soil Research**, v. 29, n. 6, p. 815-828, 1991.

OKOLO, C. C. et al. Accumulation of organic carbon in various soil aggregate sizes under different land use systems in a semi-arid environment. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 297, p. 1-13, 2020.

PANOSSO, A.R. et al. Variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> em Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 2, p. 227-236, 2008.

PEZARICO, C. R. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n. 1, p. 40-47, 2013.

POLANÍA-HINCAPIÉ, K. L. et al. Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. **Geoderma**, v. 386, p. 1-10, 2021.

RAHMAN, N. et al. Changes in soil organic carbon stocks after conversion from forest to oil palm plantations in Malaysian Borneo. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 10, p. 1-10, 2018.

RAHMAN, N. et al. The effects of management practices on soil organic carbon stocks of oil palm plantations in Sumatra, Indonesia. **Journal of Environmental Management**, v. 278, p. 1-9, 2021.

RAMOS, H. M. N. et al. Above-and belowground carbon stocks of two organic, agroforestry based oil palm production systems in eastern Amazonia. **Agroforestry systems**, v. 92, n. 2, p. 221-237, 2018.

RODRÍGUEZ, L. et al. Agroforestry systems impact soil macroaggregation and enhance carbono storage in Colombian deforested Amazonia. **Geoderma**, v. 384, p. 1-10, 2021.

ROJAS M. J. et al. Biomass decomposition dynamic in agroforestry systems with *Theobroma cacao* L. in Rionegro, Santander (Colombia). **Agronomía Colombiana**, v. 35, n. 2, p. 182-189, 2017.

RÜEGG, J. et al. Drivers of soil carbon stabilization in oil palm plantations. **Land Degradation and Development**, v. 30, n. 16, p. 1904-1915, 2019.

SALTON, J. C. et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 11-21, 2008.

SANTOS, H. G. et al. 5. ed. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SCHIELZETH, Holger; NAKAGAWA, Shinichi. Nested by design: model fitting and interpretation in a mixed model era. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 4, n. 1, p. 14-24, 2013.

SCHJØNNING, P. et al. Soil quality aspects of humid sandy loams as influenced by organic and conventional long-term management. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 88, n. 3, p. 195-214, 2002.

SEDAP, 2021. **Secretária de Estado de Desenvolvimento Agropecuário e da pesca**. Disponível em: <<http://www.sedap.pa.gov.br/>>. Acesso em: 07 de set. 2021.

SILVA CHAVES, S. F. et al. Evaluation of physicochemical attributes of a yellow latosol under agroforestry system as compared to secondary forest in the Eastern Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 5, p. 1903-1912, 2020.

SILVA MAIA, R. et al. Oil palm (*Elaeis guineensis*) shows higher mycorrhizal colonization when planted in agroforestry than in monoculture. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. 4, p. 731-740, 2021.

SILVA-OLAYA, A. M. et al. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. **Environmental Research Letters**, v. 8, p. 1-8, 2013.

SIX, J. A. E. T. Et al. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 14, p. 2099-2103, 2000.

SOUZA, E. B. et al. Precipitação sazonal sobre a Amazônia oriental no período chuvoso: Observações e simulações regionais com o RegCM3. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, p. 111-124, 2009.

STOLF, R. et al. Penetrômetro de impacto Stolf - programa computacional de dados em EXCEL-VBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 774-782, 2014.

SU, Y. Z. et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil-carbon sequestration and soil fertility under the wheat–wheat–maize cropping system in northwest China. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 75, n. 1, p. 285-295, 2006.

TAYLOR, H. M. et al. Soil strength-root penetration relations for medium-to coarse-textured soil materials. **Soil science**, v. 102, n. 1, p. 18-22, 1966.

TEIXEIRA, P. C. et al. 3. ed. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

THOMAZINI, A. et al. SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, p. 15-24, 2015.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water stable aggregates in soil. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

TORMENA, C. A. et al. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.22, n.4, p.573-581, 1998.

TRIBERTI, L. et al. Can mineral and organic fertilization help sequester carbon dioxide in cropland?. **European Journal of Agronomy**, v. 29, n. 1, p. 13-20, 2008.

VAZ, C. M. et al. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 92-101, 2011.

XIAO, L. et al. Increased soil aggregate stability is strongly correlated with root and soil properties along a gradient of secondary succession on the Loess Plateau. **Ecological Engineering**, v. 143, p. 1-9, 2020.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of the American Society of Agronomy**, v. 28, n. 5, p. 337-351, 1936.

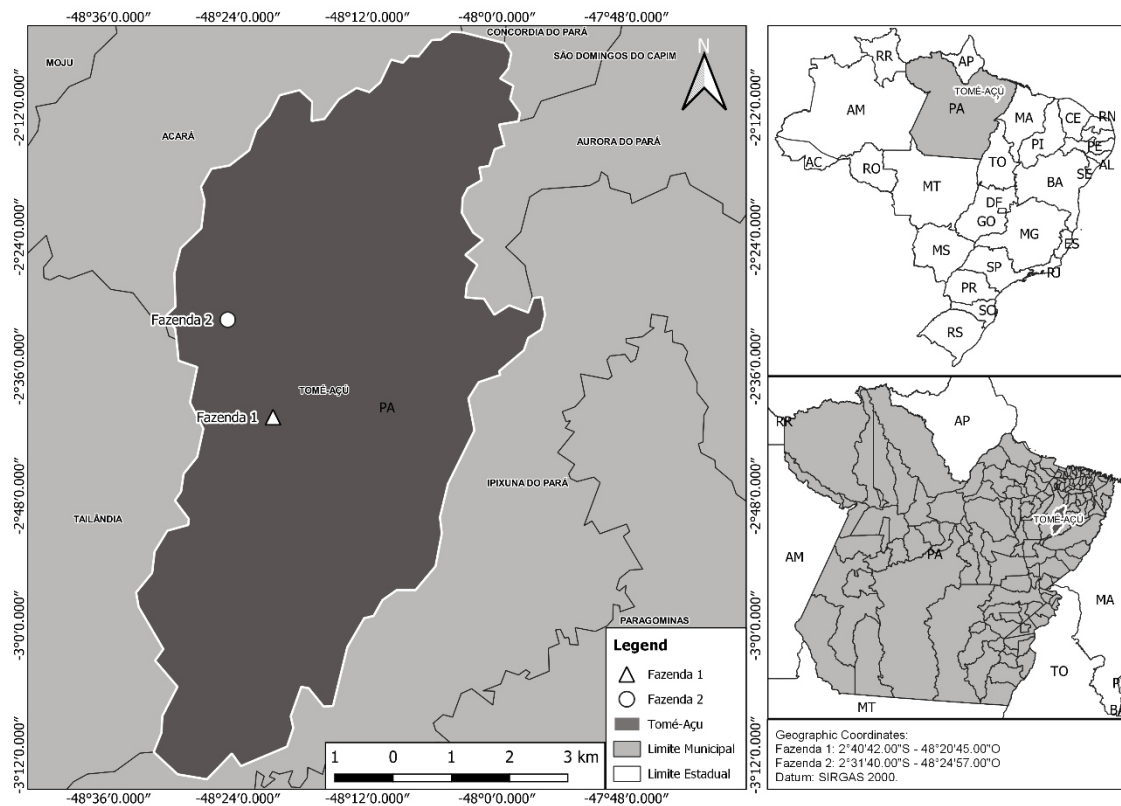
ZHAO, H. et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 178-186, 2018.

ZHONG, X. et al. Physical protection by soil aggregates stabilizes soil organic carbon under simulated N deposition in a subtropical forest of China. **Geoderma**, v. 285, p. 323-332, 2017.

ZUUR, A. F. et al. **Mixed effects models and extensions in ecology with R**. New York: Springer, 2009.



**Figura 1** - Mapa de localização do sistema agroflorestal (Fazenda 1) e monocultivo (Fazenda 2) com palma de óleo em Tomé-Açu, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.



**Tabela 1.** Caracterização de granulometria e de fertilidade do solo em cultivos de palma de óleo (sistema agroflorestal e monocultivo) em Tomé-Açu, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

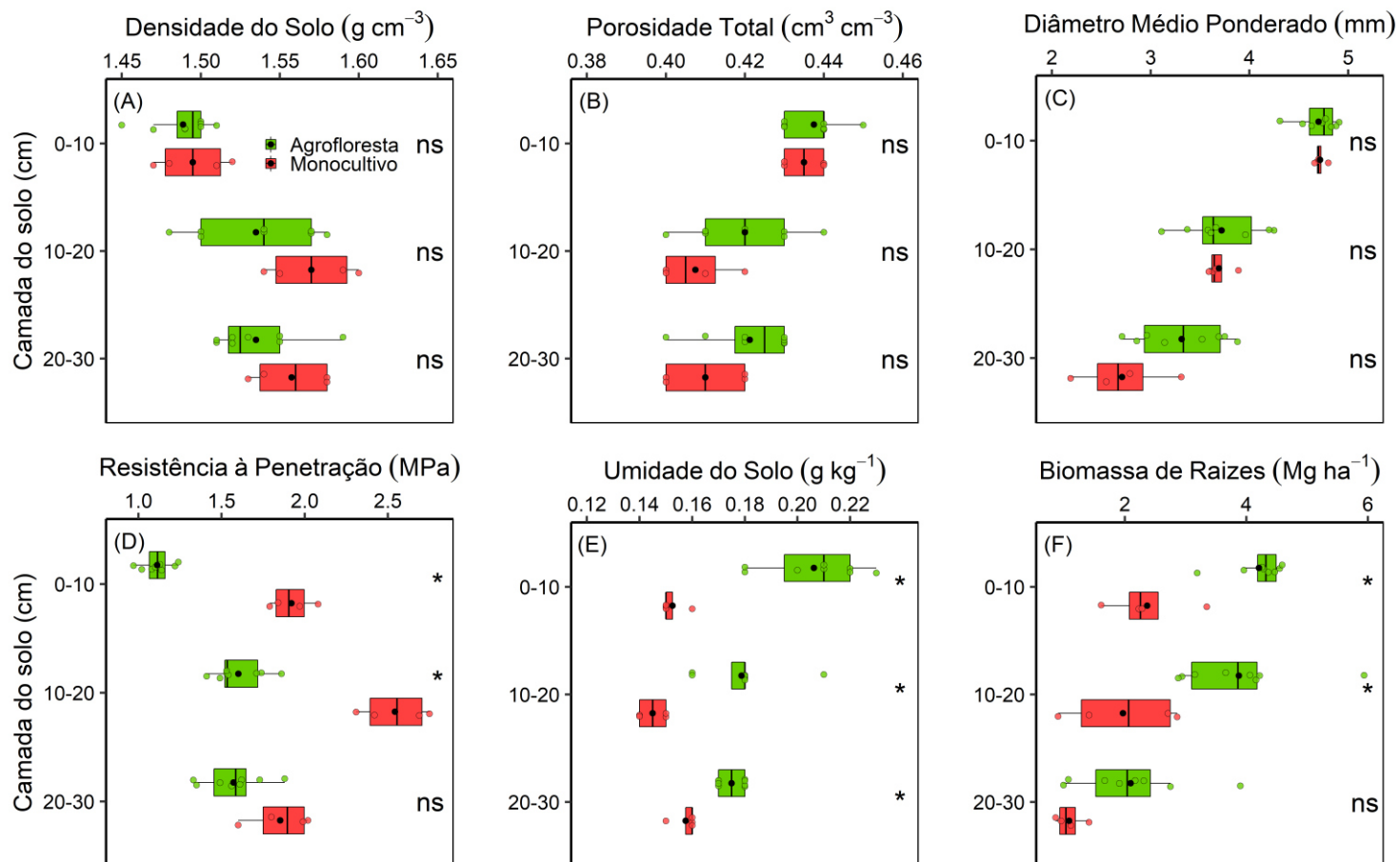
Camadas do Solo (cm)	pH H <sub>2</sub> O	P	K mg dm <sup>-3</sup>	Ca	Mg	Al cmolc dm <sup>-3</sup>	H+Al	CTC	V %	MOS g kg <sup>-1</sup>	Areia	Silt g kg <sup>-1</sup>	Argila
Sistema agroflorestal													
0-10	5,6	7,7	44,7	2,7	0,7	0,1	2,5	5,9	57,2	17,7	765	75	160
10-20	5,1	3,9	39,6	1,3	0,4	0,2	2,5	4,3	42,1	9,7	636	144	220
20-30	5,0	2,5	27,8	1,1	0,3	0,3	2,4	4,0	38,8	6,9	615	135	250
Monocultivo													
0-10	5,3	8,5	31,0	1,9	0,5	0,1	3,0	5,1	43,8	12,0	821	89	90
10-20	5,0	3,0	19,0	1,3	0,4	0,2	3,1	4,4	35,5	10,0	752	109	140
20-30	5,0	1,3	18,0	1,1	0,3	0,2	3,0	4,5	36,5	7,0	653	87	260

MOS: matéria orgânica do solo. V: saturação por bases do solo.

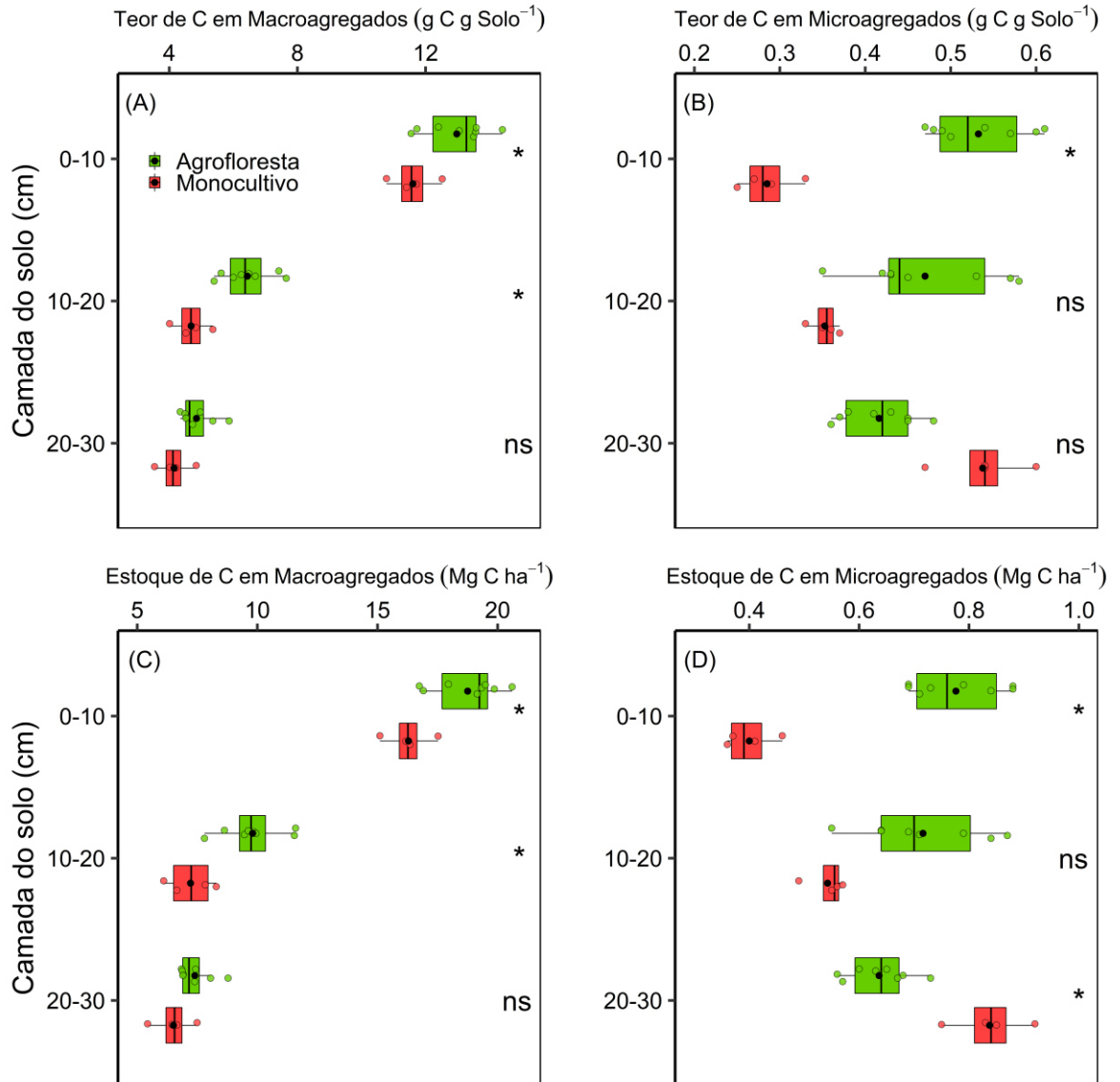
**Tabela 3.** Área relativa (%) ocupada pelas zonas de manejo coroamento da palma de óleo (ACP), caminho da colheita (CAR), pilha de folhas (PIL) e faixa diversificada (DIV) em cultivos de palma de óleo (sistemas agroflorestais e monocultivo) em Tomé-Açu, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

<b>Sistemas</b>	<b>Zonas de manejo</b>			
	<b>ACP</b>	<b>CAR</b>	<b>PIL</b>	<b>DIV</b>
SAFs - A	21,57	20,50	20,73	37,20
SAFs - B	18,24	20,07	24,64	37,05
Monocultivo	32,58	45,72	21,70	-----

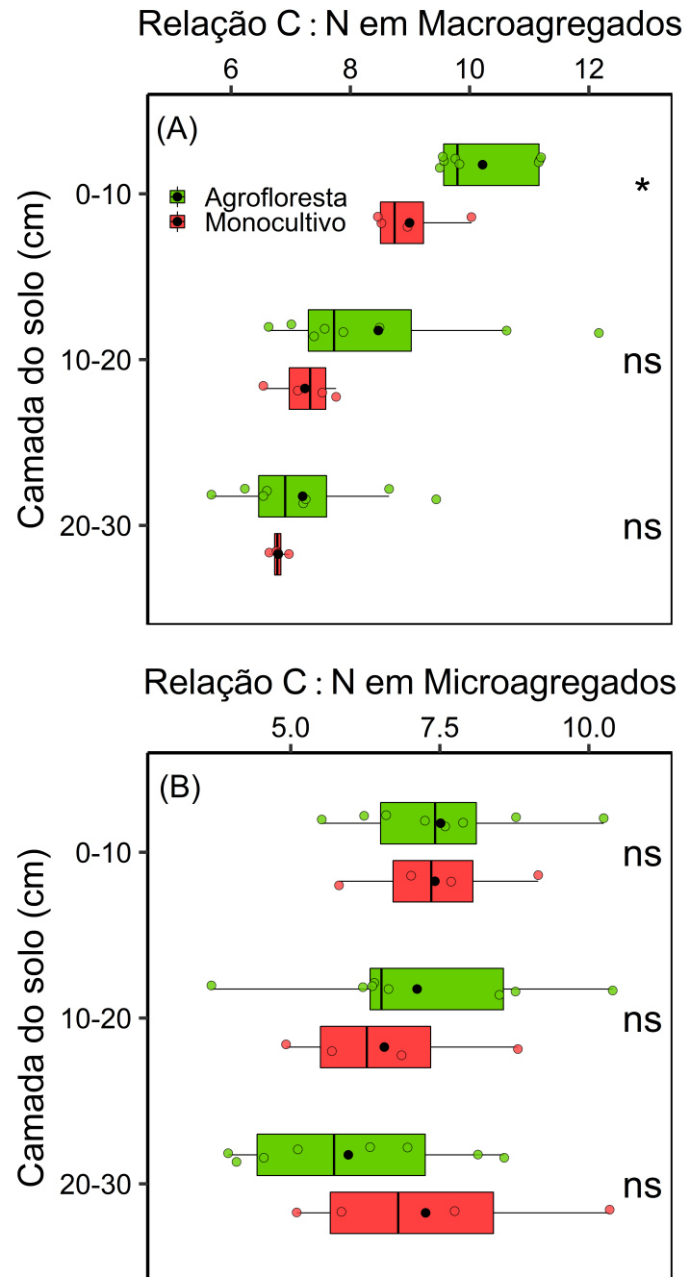
**Figura 2** - Densidade (A), porosidade (B), diâmetro médio ponderado (C), resistência à penetração (D), umidade do solo (E) e biomassa de raízes (F) em cultivos de palma de óleo (sistema agroflorestal e monocultivo) em Tomé-Açu, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. O ponto de cor preta no boxplot corresponde a média.



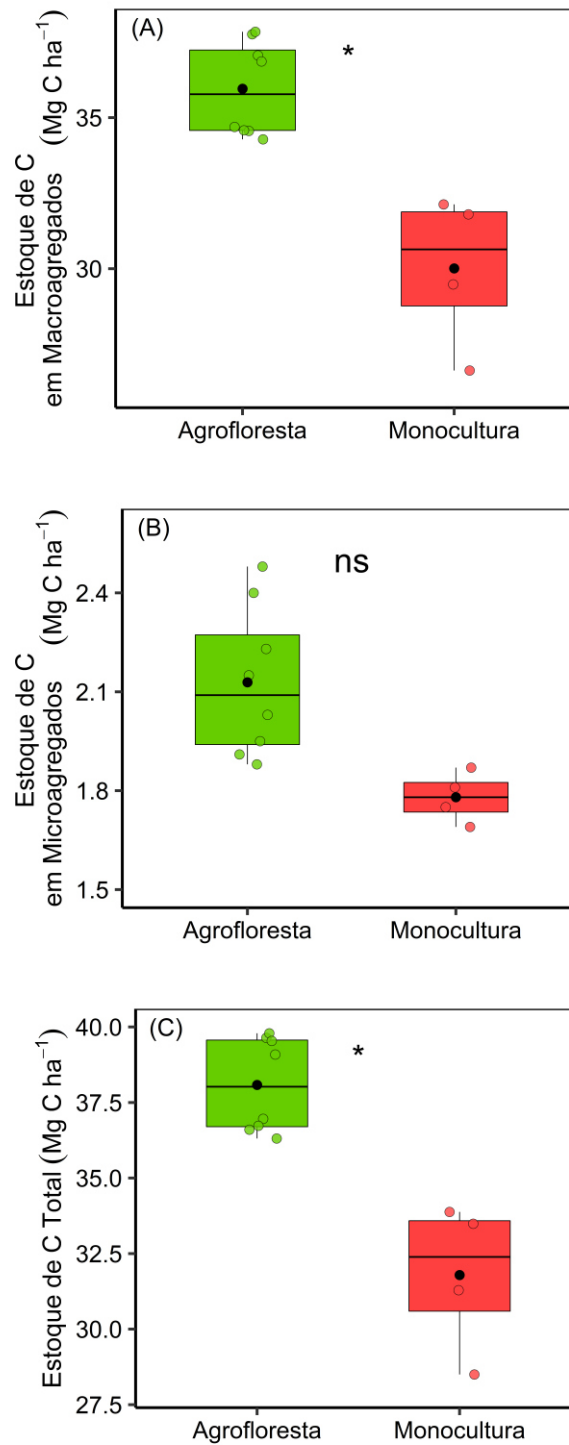
**Figura 3** - Teor e estoque de carbono (C) em macroagregados (A e C) e microagregados do solo (B e D) em cultivos de palma de óleo (sistema agroflorestal e monocultivo) em Tomé-Açu, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. O ponto de cor preta no boxplot corresponde a média.



**Figura 4** - Relação carbono/nitrogênio (C:N) em macroagregados (A) e microagregados (B) em cultivos de palma de óleo (sistema agroflorestal e monocultivo) em Tomé-Açu, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. O ponto de cor preta no boxplot corresponde a média.



**Figura 5** - Estoque de carbono (C) na camada 0-30 cm do solo das frações macroagregados (A) e microagregados (B), e da soma das frações (total) (C), em cultivos de palma de óleo (sistema agroflorestal e monocultivo) em Tomé-Açu, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. O ponto de cor preta no boxplot corresponde a média.







**Tabela 2.** Tabela de desvio (Type II tests) das variáveis do solo em diferentes camadas em sistemas de produção com palma de óleo em Tomé-Açu, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

<b>Efeito fixo</b>			
<b>Resposta</b>	<b>Chisq</b>	<b>df</b>	<b>Pr(&gt;Chisq)</b>
<b>0-10 cm</b>			
Densidade do Solo	0.1701	1	0.6801
Porosidade Total	0.3333	1	0.5637
Resistência à Penetração	157.57	1	2.20E-16
Umidade do Solo	5.0937	1	0.02401
Diâmetro Médio Ponderado	0.0033	1	0.9544
Carbono em Macroagregados	4.6789	1	0.03053
Carbono em Microagregados	9.0499	1	0.002627
C:N em Macroagregados	6.5699	1	0.01037
C:N em Microagregados	0.0114	1	0.9148
Estoque de carbono em Macroagregados	7.9896	1	0.004705
Estoque de carbono em Microagregados	9.2953	1	0.002297
Estoque de Raízes	29.835	1	4.70E-08
<b>10-20 cm</b>			
Densidade do Solo	0.4537	1	0.5006
Porosidade Total	0.5208	1	0.4705
Resistência à Penetração	80.15	1	2.20E-16
Umidade do Solo	4.9592	1	0.02595
Diâmetro Médio Ponderado	0.0023	1	0.9616
Carbono em Macroagregados	15.178	1	9.78E-05
Carbono em Microagregados	1.3919	1	0.2381
C:N em Macroagregados	0.3531	1	0.5524
C:N em Microagregados	0.2121	1	0.6451
Estoque de Carbono em Macroagregados	11.998	1	0.0005327
Estoque de Carbono em Microagregados	2.129	1	0.1445
Estoque de Raízes	9.9559	1	0.001603
<b>20-30 cm</b>			
Densidade do Solo	0.551	1	0.4579
Porosidade Total	1.08	1	0.2987
Resistência à Penetração	2.8462	1	0.09159
Umidade do Solo	16.333	1	5.31E-05
Diâmetro Médio Ponderado	0.7738	1	0.379
Carbono em Macroagregados	1.5167	1	0.2181
Carbono em Microagregados	3.7292	1	0.05347
C:N em Macroagregados	0.0936	1	0.7596
C:N em Microagregados	0.4702	1	0.4929
Estoque de Carbono em Macroagregados	1.7078	1	0.1913
Estoque de Carbono em Microagregados	6.3114	1	0.012
Estoque de Raízes	1.5103	1	0.2191
<b>0-30 cm</b>			
Estoque de Carbono em Macroagregados	25.812	1	3.76E-07
Estoque de Carbono em Microagregados	1.1687	1	0.2797
Estoque de Carbono Total	29.961	1	4.41E-08

## CAPÍTULO 4 - RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM SISTEMA AGROFLORESTAL COM DENDEZEIRO NA AMAZÔNIA

### RESUMO

A resistência à penetração (RP) tem sido a propriedade física mais indicada para estudar o estado de compactação dos solos em sistemas agropecuários e florestais. As práticas de manejo realizadas nos sistemas de produção podem impactar na RP. Na Amazônia, não se tem conhecimento de estudos sobre a dinâmica da RP em sistemas agroflorestais (SAFs) com palma de óleo. Assim, o objetivo do nosso trabalho foi caracterizar a dinâmica da RP em função da umidade do solo nas zonas de manejo de um SAF com palma de óleo na Amazônia Oriental. Coletamos amostras de solo nas zonas de manejo (coroamento da palma de óleo, caminho da colheita, pilha de folhas e faixa diversificada) nas camadas 0-10; 10-20 e 20-30 cm do solo. Determinamos a densidade do solo e a porosidade total. A RP foi medida em campo com um penetrômetro de impacto. Nos locais que medimos a RP coletamos amostras de solo para determinação da umidade volumétrica. Com os dados de RP e umidade volumétrica do solo medidos em campo, ajustamos a uma equação proposta por Busscher et al, (1997), que prediz a RP em função da umidade. Os dados de precipitação, evapotranspiração e parâmetros hidráulicos do solo utilizamos na simulação com o Hydrus-1D, a fim de verificar a dinâmica da umidade volumétrica na zona pilha de folhas. Com a umidade volumétrica, a RP foi estimada no período 2008-2020. A densidade do solo é maior e a porosidade total é menor no caminho da colheita comparado ao coroamento da palma de óleo, pilha de folhas e faixa diversificada. Em geral, o caminho da colheita apresentou maior RP do que as demais zonas de manejo, principalmente no período de menor umidade do solo. A RP na zona pilha de folhas na camada 0-10 cm, nos meses de menor e maior umidade ficou abaixo do limite crítico (2 MPa). A RP aumentou com a profundidade do solo, provavelmente pelo aumento da densidade, diminuição do teor de matéria orgânica e aumento dos teores de argila do solo. Portanto, as práticas de manejo realizadas no SAF influenciam na RP. Dependendo do conteúdo de água do solo a RP atingiu valores críticos, que limitam o crescimento de raízes.

**Palavras-chave:** Água no solo. Atributos físicos. Compactação. Qualidade do solo.

### ABSTRACT

Penetration resistance (PR) has been the most suitable physical property to study the state of soil compaction in agricultural and forestry systems. Management practices carried out in production systems can impact PR. In the Amazon, there are no studies on the dynamics of PR in agroforestry systems (AFS) with oil palm. Thus, the objective of our work was to characterize the dynamics of the PR as a function of soil moisture in the management zones of AFS with oil palm in the Eastern Amazon. We collected soil samples in the management zones (weeded circle, harvest path, leaf pile and diversified strip) in the depths 0-10; 10-20 and 20-30 cm from the ground. We determined the soil density and the total porosity. PR was measured in the field with an impact penetrometer. In the places where we measured the PR, we collected soil samples to determine the volumetric moisture. With the PR and volumetric soil moisture data measured in the field, we adjusted to an equation proposed by Busscher et al, (1997), which predicts PR as a function of moisture. Data from precipitation, evapotranspiration and soil

hydraulic parameters were used in the simulation with Hydrus-1D, in order to verify the dynamics of volumetric moisture in the leaf pile zone. With volumetric moisture, the PR was estimated in the period 2008-2020. Soil density is higher and total porosity is smaller on the way to harvest compared to oil palm weeded circle, leaf pile and diversified strip. In general, the harvest path presented higher PR than the other management zones, especially in the period of smaller soil moisture. The PR in the leaf pile zone in the 0-10 cm layer, in the months of smaller and higher moisture, was below the critical limit (2 MPa). The PR increased with soil depth, probably due to the increase in apparent density, decrease in organic matter content and increase in soil clay contents. Therefore, the management practices in the AFS influence in the PR. Depending on the water content of the soil, the PR reached critical values, which limit root growth.

**Keywords:** Compaction. Physical attributes. Soil quality. Water in the soil.

#### 4.1 Introdução

O dendezeiro ou palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) é uma palmeira oleaginosa de origem Africana e tem sido cultivada tradicionalmente na Amazônia em sistemas de monocultivo (SEDAP, 2022). No entanto, sistemas agroflorestais (SAFs) baseados no dendezeiro têm sido estudados e recomendados como alternativa de menor impacto ambiental na Amazônia (CARVALHO et al., 2014; RAMOS et al., 2018) e com potencial de melhorar a qualidade do solo, comparado ao monocultivo de dendê (GOMES et al., 2021).

A qualidade do solo pode ser avaliada por meio dos atributos físicos (GOVINDASAMY et al., 2020; POLANÍA-HINCAPIÉ et al., 2021; SOUZA et al., 2019), químicos (BEHERA et al., 2020; MÁLAGA et al., 2021) e biológicos (HARON et al., 1998; SILVA JÚNIOR et al., 2018). A resistência à penetração (RP) tem sido a propriedade física mais utilizada para caracterizar o estado de compactação dos solos em resposta as práticas de manejo realizada nos sistemas de produção (DEARMOND et al., 2020; JUNG et al., 2010; SILVEIRA et al., 2010) e com isso, inferir sobre a qualidade física do solo nos sistemas de cultivo (MORAES et al., 2012). A RP é influenciada por vários fatores como densidade, teor de matéria orgânica, textura e a umidade do solo (GABRIEL et al., 2021; SAYEDAHMED, 2015; VAZ et al., 2011).

Muitos estudos têm explorado a relação entre RP e umidade do solo (BUSSCHER et al., 1997; SILVIERA et al., 2010; VAZ et al., 2011). As práticas de manejo, podem influenciar na densidade do solo, teor de matéria orgânica e na umidade e, conseqüentemente, na RP (FIDALSKI; TORMENA, 2007; GABRIEL et al., 2021; SAYEDAHMED, 2015). Dependendo da variação do conteúdo de água no solo a RP pode atingir valores superiores ao limite crítico para o crescimento de raízes (BLAINSKI et al., 2008; SATO et al., 2017; SAYEDAHMED,

2015). No geral, 2 MPa tem sido adotado como limite crítico de RP que pode afetar o crescimento de raízes (TORMENA et al., 2007; ZOU et al., 2000).

O manejo do cultivo da palma de óleo cria zonas no terreno em que os atributos do solo variam marcadamente (NELSON et al., 2015). As zonas de manejo em cultivos de palma de óleo são determinadas por: (1) empilhamento das folhas podadas da palma de óleo, (2) adubação e controle de plantas espontâneas próximo ao estipe da planta, na área de coroamento da palma de óleo e (3) utilização de máquinas e implementos agrícolas nas entrelinhas da cultura, para a colheita dos frutos e manejo do sistema. O manejo realizado nessas zonas leva a uma clara heterogeneidade espacial nos teores de carbono e na densidade do solo (FRAZÃO et al., 2013; RAMOS et al., 2018), que provavelmente impactará na RP.

Na Amazônia, não se tem conhecimento de estudos sobre a dinâmica da RP em SAFs com palma de óleo. Nos sistemas de cultivo, as práticas de manejo podem influenciar na dinâmica da RP. A degradação de terras e as mudanças climáticas têm pressionado a busca por práticas de manejo e sistemas de produção que promovam mais serviços ambientais, como a conservação do solo e da água (CHERUBIN; CHAVARRO-BERMEJO; SILVA-OLAYA, 2019; STEFANOSKI et al., 2013). Assim, sabendo que o manejo realizado em cultivos de palma de óleo, causa impactos sobre o solo, se torna imprescindível monitorarmos o estado de compactação do solo, por meio do estudo da relação entre RP e umidade do solo.

Os estudos de RP e umidade do solo, no geral, têm sido realizados em diversos sistemas agropecuários (LIMA et al., 2010; MORAES et al., 2020) e florestal (DEARMOND et al., 2020). Contudo, pesquisas sobre a dinâmica da RP e umidade do solo, em SAFs com palma de óleo, não têm sido relatadas na Amazônia. Portanto, o objetivo do nosso trabalho é caracterizar a dinâmica da RP em função da umidade do solo nas zonas de manejo de um SAF com palma de óleo na Amazônia Oriental.

## **4.2 Material e Métodos**

### **4.2.1 Área de estudo**

A pesquisa foi desenvolvida em uma propriedade rural familiar localizado no município de Tomé-Açu, Amazônia Oriental, Brasil (Figura 1). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Ami (ALVARES et al., 2013) com temperatura média anual de 26 °C e a precipitação média anual de 2400 mm, com período mais chuvoso nos meses de dezembro a junho e menos chuvoso de julho a novembro. O solo da área de estudo é caracterizado como

Latossolo Amarelo Distrófico (SANTOS et al., 2018) de textura franco argilo-arenosa. A caracterização da granulometria e da fertilidade do solo da área de estudo estão apresentadas na Tabela 1.

Avaliamos um SAF com palma de óleo com 13 anos de idade: o SAF ocupava 2 ha e tinha a palma de óleo como espécie de maior interesse econômico. O sistema consistia em linhas duplas de dendê (espaçamento de 7,5 m entre linhas e 9,0 m entre plantas) alternadas por faixas diversificadas (15 m de largura) com plantio de espécies arbustivas e arbóreas. Além da palma de óleo, as espécies predominantes no SAF eram: arbustiva: *Theobroma cacao* Linn (cacau) e arbóreo: *Euterpe oleracea* Mart (açai), *Carapa guianensis* Aubl (andiroba), *Oenocarpus mapora* H, Karsten (bacabi), *Bertholletia excelsa* (castanha), *Adenanthera pavonina* (falso pau-brasil), *Inga edulis* Mart (ingá), *Tabebuia* sp (ipê), *Hymenaea courbaril* L (jatobá), *Mangifera indica* L (manga), *Swietenia macrophylla* King (mogno), *Azadirachta indica* (nim), *Virola surinamensis* (ucuuba).

Na zona de coroamento da palma de óleo, próximo ao estipe do dendezeiro, foram aplicados adubos orgânicos e inorgânicos (Tabela 2 do capítulo 2). Para colheita dos cachos de palma de óleo, foi utilizado trator da marca Tobata, aproximadamente a cada 15 dias durante o período produtivo. A zona de tráfego do maquinário, localizado entre as linhas de palma de óleo, é denominada de caminho da colheita. Roçagem mecânica da vegetação espontânea foi realizada no caminho da colheita e na zona de coroamento da palma de óleo. Duas vezes ao ano, as folhas da palma de óleo foram podadas e empilhadas ao lado do dendezeiro ao longo da linha de plantio. Na faixa diversificada em 2008, foram aplicados 40 kg planta<sup>-1</sup> de composto orgânico e 10 kg planta<sup>-1</sup> de moinha de carvão e cama de frango. O material da poda das espécies da faixa diversificada e as cascas dos frutos de *T. cacao* foram depositados sobre o solo dessa zona de manejo. Na faixa diversificada, a roçagem foi manual.

#### 4.2.2 Coleta de solo

Em 2018, delimitamos cinco parcelas medindo 30 m x 30 m no SAF de forma a incluir a linha dupla de palma de óleo e a faixa diversificada. Definimos quatro locais de coletas (zonas de manejo) em cada parcela de acordo com o arranjo espacial das espécies e o manejo do sistema (a) coroamento da palma de óleo - zona em que as plantas indesejadas foram removidas e que foi adubada, localizada a 60 cm da base do estipe do dendezeiro; (b) caminho da colheita - zona de tráfego de máquinas, (c) pilha de folhas - zona em que as folhas da palma de óleo (e de outras espécies, principalmente do cacau) eram depositadas; e (d) faixa diversificada.

Em cada zona de manejo, coletamos: (1) três amostras indeformadas de solo em cilindros volumétricos (diâmetro: 5 cm, altura: 5 cm); e (2) cinco amostras deformadas (com trado), que foram reunidas para formar uma amostra composta. As amostras indeformadas e deformadas de solo foram coletadas nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm do solo. Para representar a camada 0-10 cm, utilizamos a média das camadas 0-5 e 5-10 cm do solo.

#### **4.2.3 Análises das amostras de solo**

As amostras indeformadas de solo em cilindros volumétricos colocamos em estufa a 105 °C por um período de 48 horas até peso constante. Retiramos as amostras da estufa e deixamos esfria em dessecador sob vácuo e, em seguida levamos para pesagem em balança com precisão de duas casas decimais, para determinação do peso do solo seco (TEIXEIRA et al., 2017).

Utilizamos amostras de solo que foram destorroadas e passadas em peneira de 2,0 mm para determinação da granulometria, pelo método da pipeta e fertilidade do solo (TEIXEIRA et al., 2017).

Para determinação da umidade gravimétrica (TEIXEIRA et al., 2017), coletamos amostras deformadas de solo com trado sonda, próximo dos locais em que medimos a resistência à penetração.

#### **4.2.4 Determinação da densidade, porosidade total e umidade volumétrica do solo**

Determinamos a densidade do solo, porosidade total e umidade volumétrica, conforme as equações abaixo respectivamente (TEIXEIRA et al., 2017):

$$D_s = \frac{m_s}{V}$$

$D_s$ : densidade do solo, em  $\text{g cm}^{-3}$ ;

$m_s$ : massa do solo seco em estufa a 105 °C até peso constante, em g;

$V$ : volume do cilindro, em  $\text{cm}^3$ .

$$P_t = 1 - \left( \frac{D_s}{D_p} \right)$$

$P_t$ : porosidade total, em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$D_s$ : densidade do solo, em  $\text{g cm}^{-3}$ ;

$D_p$ : densidade de partículas (2,65), em  $\text{g cm}^{-3}$ .

$$\theta_v = \theta_g * D_s$$

$\theta_v$ : umidade volumétrica, em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$\theta_g$ : umidade gravimétrica, em  $\text{g g}^{-1}$ ;

$D_s$ : densidade do solo, em  $\text{g cm}^{-3}$ .

#### **4.2.5 Determinação da precipitação e evapotranspiração potencial (ETo)**

Os dados de precipitação e evapotranspiração de referência diária (ETo) foram obtidos do banco de dados da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no município de Tomé-Açu (A213), para o período de 2008-2020. As falhas nos dados de clima foram preenchidas por meio do projeto Nasa Power (STACKHOUSE, 2021). A ETo calculamos pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

#### **4.2.6 Determinação da resistência do solo à penetração (RP)**

A resistência do solo à penetração determinamos por meio de um penetrômetro de impacto (modelo STOLF, KAMAK, Brasil), com um ângulo do cone de  $30^\circ$ . As leituras feitas em campo foram registradas e posteriormente processadas em um programa Excel VBA desenvolvido por Stolf et al. (2014). Por meio deste programa, os dados foram convertidos em resistência mecânica (MPa), para cada camada do solo. Avaliamos a RP nas zonas de manejo até a profundidade de 30 cm com 12 repetições. No momento da medição da RP, coletamos amostras de solo para determinamos a umidade gravimétrica. A equação que utilizamos para transformar o número de impactos  $\text{dm}^{-1}$  em resistência mecânica (MPa), foi proposta por Stolf et al. (1991, 1998, 2005, 2014):

$$RP \text{ (MPa)} = 5,6 + 6,89 \times N \text{ (impactos } dm^{-1}) \times 0,1$$

RP: resistência do solo à penetração, em MPa e N: é  $10 \times n^\circ$  de impactos dividido pela penetração do cone, em cm.

#### 4.2.7 Ajuste da RP em função da umidade e densidade do solo

A partir dos dados de RP medidos em campo, ajustamos a quatro equações que predizem a RP em função da umidade volumétrica e densidade do solo. Para o ajuste das equações utilizamos o programa Solver do Office Excel, versão 2019. As equações ajustadas foram:

- (1)  $RP = a \exp(-b \cdot \theta_v)$  - Busscher et al. (1997);
- (2)  $RP = c \cdot \theta_v^d \cdot D_s^e$  - Busscher (1990);
- (3)  $RP = \exp(a + b \cdot D_s + c \cdot \theta_v)$  - Jakobsen e Dexter (1987);
- (4)  $RP = a \cdot (D_s/D_p)^n \cdot \exp(-b \cdot \theta_v)$  - Upadhyaya et al. (1982);

RP: resistência à penetração, em MPa;  $\theta_v$ : umidade volumétrica, em  $cm^3 \text{ cm}^{-3}$ ;  $D_s$ : densidade do solo, em  $g \text{ cm}^{-3}$ ;  $D_p$ : densidade de partículas, em  $g \text{ cm}^{-3}$ ; e a, b, c, d, e, n: parâmetros de ajuste das equações.

#### 4.2.8 Simulação da umidade volumétrica no Hydrus-1D

Escolhemos especificamente a zona de manejo pilha de folhas para simularmos a dinâmica da umidade volumétrica do solo nessa zona, nas camadas 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm do solo, a fim de termos uma caracterização contínua de RP estimada em função da umidade. No Hydrus-1D, simulamos a umidade do solo com os dados de precipitação, ETo e os parâmetros hidráulicos do solo (umidade residual:  $\theta_r$ , umidade de saturação:  $\theta_s$ , alfa:  $\alpha$  e n). Coleta, procedimento da análise e o ajuste dos parâmetros hidráulicos do solo podem ser conferidos com mais detalhes no Capítulo 2 desta tese. Com os dados obtidos para umidade, utilizamos a equação ajustada de RP, proposta por Busscher et al. (1997), para predizermos a RP, em função da umidade volumétrica no período 2008-2020.



#### 4.2.9 Análise estatística

Usamos análise de variância de um fator (Anova,  $p \leq 0,05$ ) para testar o efeito das zonas de manejo sobre as variáveis, densidade do solo e porosidade total, separadamente por camada de solo, adotando o delineamento inteiramente casualizado. Para comparação das médias aplicamos o teste Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Realizamos as análises estatísticas com o software AgroEstat (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2016) e os gráficos para apresentação dos resultados foram plotados no software SigmaPlot 11,0.

#### 4.3 Resultados

A zona caminho da colheita apresentou estatisticamente maior densidade do solo e menor porosidade total comparado ao coroamento da palma de óleo, pilha de folhas e faixa diversificada na camada 0-10 cm do solo. Em relação às camadas 10-20 e 20-30 cm, não encontramos diferenças significativas entre as zonas de manejo (Tabela 2).

Em geral, as equações de ajustes de RP apresentaram desempenho semelhantes em todas as zonas de manejo e camadas do solo (Tabela 3). A equação que prediz a RP em função da umidade volumétrica ( $RP = a * \exp -b * \theta_v$ ) merece maior atenção, por estimar a RP, apenas com a variável umidade do solo.

A RP aumentou com a profundidade do solo, principalmente nos períodos de menor umidade do solo (Figura 2). No geral, quando o solo estava mais seco, observamos uma maior variação da RP entre as zonas de manejo. A tendência que encontramos é que no período de menor umidade do solo, o caminho da colheita apresentou RP superior ao limite crítico (2 MPa), para o crescimento de raízes em todas as camadas do solo. No coroamento da palma de óleo, pilha de folhas e faixa diversificada a RP foi inferior ao limite crítico nas camadas mais superficiais e tendeu a aumentar, a partir de 10 cm do solo. No período de maior umidade do solo, a RP variou pouco entre as zonas de manejo (Figura 2).

A umidade volumétrica do solo apresentou maior variação entre as zonas de manejo principalmente no período seco. Com aumento da profundidade o caminho da colheita apresentou menor umidade comparado às demais zonas de manejo. No período chuvoso o coroamento da palma de óleo teve menor umidade nas camadas subsuperficiais (Figura 2).

Os dados medidos de precipitação e ETo foram menores no período seco e maiores no período chuvoso. Verificamos que no período (2008-2020), a média anual de precipitação foi cerca de 1970,83 mm e a ETo 1086,08 mm (Figura 3A e B).

Os parâmetros ajustados da equação de van Genuchten na zona de manejo pilha de folhas nas camadas 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm do solo foram: umidade residual = 0,0002, 0,0001 e 0,0007  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , umidade de saturação = 0,53, 0,45 e 0,43  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ,  $\alpha = 1,4743, 0,4697$  e  $0,2403$  e  $n = 1,1376, 1,1239$  e  $1,1057$  com um RMSE de 0,008, 0,005 e 0,004  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , respectivamente. Os parâmetros da equação ( $RP = a * \exp -b * \theta$ ), que correlaciona a umidade volumétrica ( $\theta$ ) com a RP nas camadas 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm foram:  $a = 4,91$  e  $b = 6,13$ ,  $a = 50,93$  e  $b = 12,01$  e  $a = 29,28$  e  $b = 7,73$  respectivamente.

#### 4.4 Discussão

No geral, a densidade do solo é maior e a porosidade total é menor no caminho da colheita na superfície do solo (0-10 cm), comparado as demais zonas de manejo. No coroamento da palma de óleo, pilha de folhas e faixa diversificada devido o aporte contínuo de matéria orgânica proveniente das folhas do dendezeiro, do cacaeiro, além do manejo da adubação orgânica influenciam num maior teor de carbono e, conseqüentemente, menor densidade do solo (FRAZÃO et al., 2013; RAMOS et al., 2018). Por outro lado, no caminho da colheita, devido provavelmente o menor aporte de matéria orgânica somado ao tráfego constante de máquinas contribuem para o aumento da densidade e diminuição da porosidade total do solo em relação as outras zonas de manejo, com maior impacto na superfície do solo.

O caminho da colheita em geral, apresentou maior RP no período menos chuvoso (Figura 2). Acreditamos que a compactação do solo no caminho da colheita, em função do tráfego de máquinas nessa zona de manejo e menor presença de cobertura morta sobre o solo, contribuiu para maior RP, principalmente no período de menor precipitação e umidade do solo. Nas outras zonas de manejo (coroamento da palma de óleo, pilha de folhas e faixa diversificada) a adubação orgânica e o aporte de cobertura morta sobre o solo, proveniente das podas das plantas, contribuem para uma menor RP no período de menor umidade.

Em geral, a RP na zona de manejo pilha de folhas na camada 0-10 cm do solo, ficou abaixo do limite crítico (2 MPa), nos meses mais secos e chuvosos dos anos 2008-2020 (Figura 4B). Na superfície do solo devido a densidade aparente ser menor e por apresentar provavelmente maior teor de matéria orgânica, isso influenciou numa menor RP em comparação às camadas mais profundas do solo (10-20 cm e 20-30 cm). O manejo que favorece

a cobertura permanente do solo contribui num maior teor de matéria orgânica, menor densidade aparente e garante maior retenção de umidade e, conseqüentemente, impactará na RP (GABRIEL et al., 2021; VAZ et al., 2011).

Na camada 10-20 cm e 20-30 cm (Figura 5B e 6B), a RP foi superior ao limite crítico (2 MPa) nos meses em que a umidade do solo estava mais baixa, o que pode afetar o crescimento de raízes (TORMENA et al., 2007). O aumento da RP em profundidade pode ser por fatores como maior densidade do solo, menor teor de matéria orgânica e mudanças na textura do solo, que impactam no comportamento da RP (VAZ et al., 2011). O estudo recente de Chaves et al. (2020), na Amazônia Oriental, em sistemas agroflorestais baseados nas espécies *Passiflora edulis* e *Theobroma grandiflorum*, mostraram que a RP variou significativamente com a profundidade do solo, corroborando com os resultados apresentados neste estudo. Portanto, o aumento da RP em profundidade nesse solo, é, provavelmente, um processo natural e não uma consequência da atividade antrópica.

#### **4.5 Conclusões**

As práticas de manejo em sistemas agroflorestais com palma de óleo influenciam na resistência à penetração. Dependendo do conteúdo de água do solo e do manejo realizado, a resistência do solo à penetração atingiu valores críticos.

A resistência à penetração na zona pilha de folhas foi menor na camada superficial do solo, comparado às camadas subsuperficiais, nos períodos de maior ou menor umidade do solo.

#### **Agradecimentos**

Agradecemos aos agricultores que contribuíram para realização desta pesquisa. Ao projeto SAF Dendê: “Conciliando conservação com meios de vida”, resultado da parceria entre Cooperativa Agrícola Mista de Tomé-Açu (CAMTA), Natura Inovação e Tecnologia de Produtos-Ltda, Embrapa Amazônia Oriental (CPATU), Embrapa Solos, Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal (ICRAF), e financiado pela Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional (USAID). À Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Estado do Pará (FAPESPA) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudo a RLLO e de bolsa de produtividade em pesquisa a SSV (processo N° 312038/2015), respectivamente.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. et al. Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, **Fao, Rome**, v. 300, p. 1-333, 1998.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil, **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **Experimentação agrônômica & Agroestat: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos**, Jaboticabal: Multipress, 2016, 396 p.

BEHERA, S. K. et al. Oil palm cultivation enhances soil pH, electrical conductivity, concentrations of exchangeable calcium, magnesium, and available sulfur and soil organic carbon content. **Land Degradation & Development**, v. 31, n. 18, p. 2789-2803, 2020.

BLAINSKI, E. et al. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 975-983, 2008.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content, **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 2, p. 519-0524, 1990.

BUSSCHER, W. J. et al. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil and Tillage Research**, v. 43, n. 3-4, p. 205-217, 1997.

CARVALHO, W. R. et al. Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm based agroforestry systems in the eastern Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 88, n. 2, p. 357-368, 2014.

CHAVES, S. F. S. et al. Evaluation of physicochemical attributes of a yellow latosol under agroforestry system as compared to secondary forest in the Eastern Amazon. **Agroforestry systems**, v. 94, n. 5, p. 1903-1912, 2020.

CHERUBIN. M. R.; CHAVARRO-BERMEO. J. P.; SILVA-OLAYA. A. M. Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 5, p. 1741-1753, 2019.

DEARMOND. D. et al. An Assessment of Soil Compaction after Logging Operations in Central Amazonia. **Forest Science**, v. 66, n. 2, p. 230-241, 2020.

FIDALSKI. J.; TORMENA. C. A. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em sistemas de manejo com plantas de cobertura permanente em citros. **Ciência Rural**, v. 37, n. 5, p. 1316-1322, 2007.

FRAZÃO. L. A. et al. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. **Gcb Bioenergy**, v. 5, n. 4, p. 384-390, 2013.

GABRIEL. J. L. et al. Cover crops reduce soil resistance to penetration by preserving soil surface water content. **Geoderma**, v. 386, p. 1-8, 2021.

GOMES. M. F. et al. Oil palm agroforestry shows higher soil permanganate oxidizable carbon than monoculture plantations in Eastern Amazonia. **Land Degradation & Development**. v. 32, n. 15, p. 4313-4326, 2021.

GOVINDASAMY. P. et al. Influence of long-term (36 years) tillage practices on soil physical properties in a grain sorghum experiment in southeast Texas. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1-11, 2020.

HARON, K. et al. Microbial biomass and soil organic matter dynamics in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantations, West Malaysia. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 30, n. 5, p. 547-552, 1998.

JAKOBSEN. B. F.; DEXTER. A. R. Effect of soil structure on wheat root growth. water uptake and grain yield. A computer simulation model. **Soil and Tillage Research**, v. 10, n. 4, p. 331-345, 1987.

JUNG. KI-YUOL. et al. Soil compaction varies by crop management system over a claypan soil landscape. **Soil and Tillage Research**, v. 107, n. 1, p. 1-10, 2010.

LIMA. C. L. R. et al. Produtividade de culturas e resistência à penetração de Argissolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 45, n. 1, p. 89-98, 2010.

MÁLAGA, N. et al. Variation in vegetation and ecosystem carbon stock due to the conversion of disturbed forest to oil palm plantation in Peruvian Amazonia. **Ecosystems**, v. 24, n. 2, p. 351-369, 2021.

MORAES. M. T. et al. Correction of resistance to penetration by pedofunctions and a reference soil water content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1704-1713, 2012.

MORAES. M. T. et al. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 200, p. 1-14, 2020.

NELSON. P. N. et al. Soil sampling in oil palm plantations: a practical design that accounts for lateral variability at the tree scale. **Plant and Soil**, v. 394, n. 1, p. 421-429, 2015.

POLANÍA-HINCAPIÉ. K. L. et al. Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. **Geoderma**, v. 386, p. 1-10, 2021.

RAMOS. H. M. N. et al. Above-and belowground carbon stocks of two organic. agroforestry-based oil palm production systems in eastern Amazonia. **Agroforestry systems**, v. 92, n. 2, p. 221-237, 2018.

SANTOS. H. G. et al. 5. ed. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília. DF: Embrapa. 2018. 356 p.

SATO. M. K. et al. Least limiting water range for oil palm production in Amazon region. Brazil. **Scientia Agricola**, v. 74, n. 2, p. 148-156, 2017.

SAYEDAHMED. A. Modeling and correlation of soil cone index for bulk density, moisture content and penetration depth levels in a sandy loam soil. **Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering**, v. 6, n. 2, p. 259-273, 2015.

SEDAP, 2022. **Secretária de Estado de Desenvolvimento Agropecuário e da Pesca**. Disponível: <<http://www.sedap.pa.gov.br/content/dend%C3%AA>>. Acesso em: 07 de fev. 2022.

SILVA JUNIOR, A. C. et al. Seasonal variation of soil attributes in oil palm plantations in the Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 2, p. 1-8, 2018.

SILVEIRA. D. C. et al. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 34, n. 3, p. 659-667, 2010.

SOUZA. F. G. et al. Physical attributes of soil under amazon forest conversion for diferente crop systems in southern Amazonas. Brazil. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 99, n. 4, p. 563-574, 2019.

STACKHOUSE. P. W. **The Power Project. Nasa Prediction of Worldwide Energy Resources. 2021**. Disponível em: <<https://power.larc.nasa.gov/>>. Acesso em: 25 de nov. 2021.

STEFANOSKI. D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

STOLF. R. et al. Measuring mechanical impedance in clayey gravelly soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 189-196, 1998.

STOLF. R. et al. Penetrômetro de impacto Stolf - programa computacional de dados em EXCEL-VBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 774-782, 2014.

STOLF. R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, p. 229-235, 1991.

STOLF. R.; REICHARDT. K.; VAZ. C. P. M. Response to “Comments on ‘Simultaneous measurement of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer - TDR moisture probe’ and ‘A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance’”. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 927-929, 2005.

TEIXEIRA. P. C. et al. 3. ed. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília. DF: Embrapa. 2017. 573 p.

TORMENA. C. A. et al. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 211-219, 2007.

UPADHYAYA. S. K. et al. Cone index prediction equations for Delaware soils [Dimensional analysis]. **Paper-American Society of Agricultural Engineers (USA). Microfiche collection. no. fiche 82-1542**. 1982.

VAZ. C. M. et al. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 92-101, 2011.

ZOU. C. et al. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. **Soil Research**, v. 38, n. 5, p. 947-958, 2000.



**Figura 1** - Localização do sítio experimental denominado (UD-1) no município de Tomé-Açu, Amazônia Oriental, Brasil.



**Tabela 1.** Caracterização granulométrica e fertilidade do solo no sistema agroflorestal (SAFs) com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental, Brasil.

	Fertilidade do Solo									Granulometria			
	pH	MOS	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	Arei	Silte	Argila	Classe textural
	H <sub>2</sub> O	g kg <sup>-1</sup>		mg dm <sup>-3</sup>				cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			g kg <sup>-1</sup>		
	Camada do solo 0-10 cm												
SAFs	5,4	26,1	29,8	74,7	1,5	2,9	0,7	0,1	3,2	593	125	282	Franco argilo-arenosa
	Camada do solo 10-20 cm												
SAFS	5,1	18,1	9,5	42,2	1,5	1,4	0,4	0,1	2,9	567	118	315	Franco argilo-arenosa
	Camada do solo 20-30 cm												
SAFs	5,0	12,5	4,7	30,8	1,5	1,2	0,3	0,1	2,6	551	113	336	Franco argilo-arenosa

MOS: matéria orgânica do solo.

**Tabela 2.** Densidade e porosidade total do solo nas zonas de manejo coroamento da palma de óleo (ACP), caminho da colheita (CAR), pilha de folhas (PIL) e faixa diversificada (DIV) no sistema agroflorestal com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental, Brasil.

<b>Densidade do Solo g cm<sup>-3</sup></b>				
<b>Camadas do solo (cm)</b>	<b>ACP</b>	<b>CAR</b>	<b>PIL</b>	<b>DIV</b>
0-10	1,30 ± 0,04* b	1,55 ± 0,02 a	1,25 ± 0,03 b	1,31 ± 0,03 b
10-20	1,41 ± 0,04 a	1,51 ± 0,02 a	1,46 ± 0,02 a	1,45 ± 0,02 a
20-30	1,48 ± 0,02 a	1,50 ± 0,02 a	1,52 ± 0,02 a	1,50 ± 0,02 a
<b>Porosidade total cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup></b>				
0-10	0,51 ± 0,01 a	0,42 ± 0,01 b	0,53 ± 0,01 a	0,50 ± 0,01 a
10-20	0,47 ± 0,02 a	0,43 ± 0,01 a	0,45 ± 0,01 a	0,45 ± 0,01 a
20-30	0,45 ± 0,01 a	0,43 ± 0,01 a	0,43 ± 0,01 a	0,43 ± 0,01 a

\*: erro padrão da média.

**Tabela 3.** Equações ajustadas de resistência à penetração (RP) nas zonas de manejo coroamento da palma de óleo (ACP), caminho da colheita (CAR), pilha de folhas (PIL) e faixa diversificada (DIV) do sistema agroflorestal com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental, Brasil. Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e correlação linear de Pearson ( $r$ ), obtidos na regressão linear ajustada entre a resistência à penetração observada e estimada. Raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro absoluto médio (EAM), calculados com base na resistência à penetração observada e estimada.

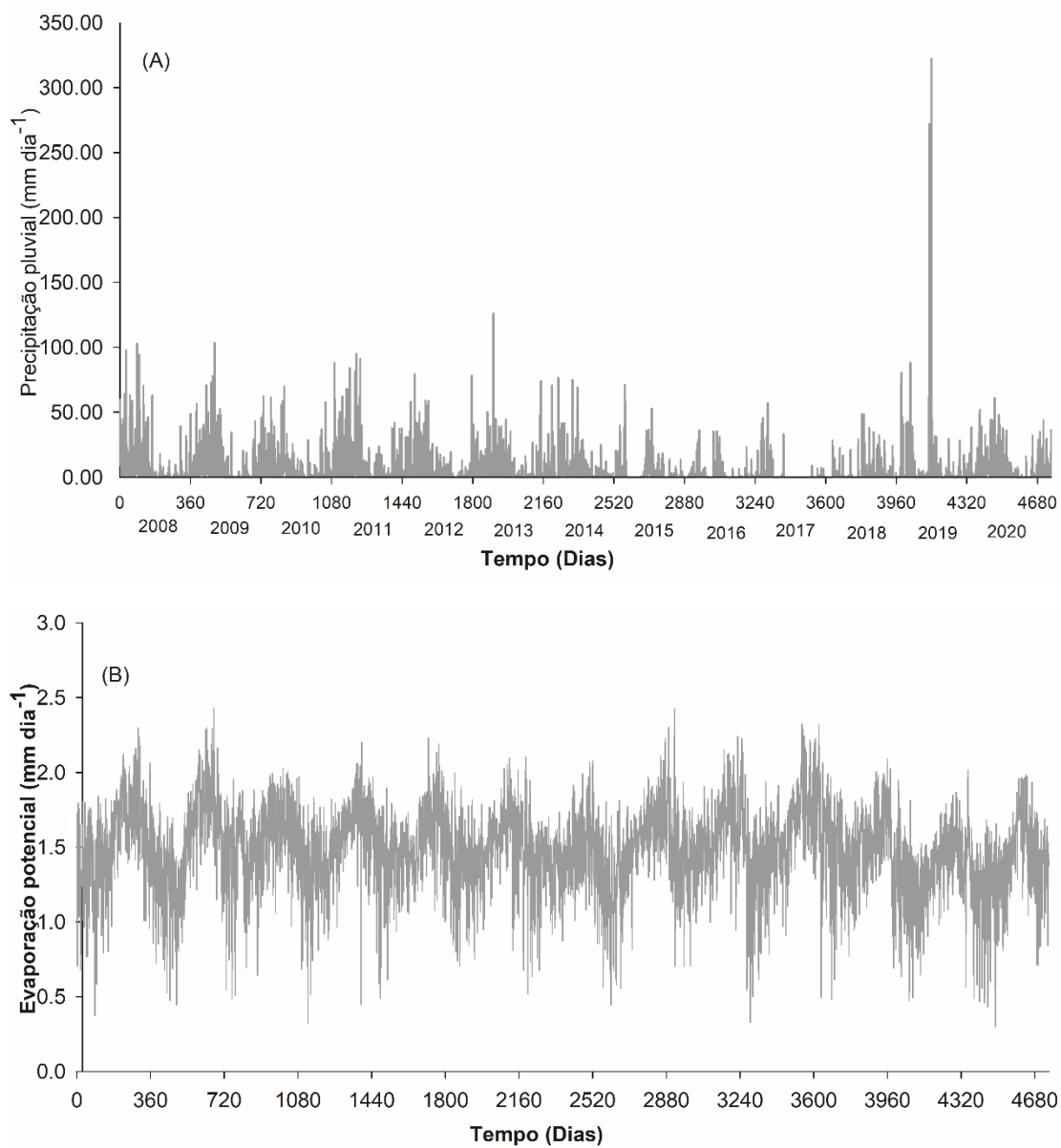
Camadas do Solo (cm)	Nº da equação	Parâmetros	Equação	$R^2$	$r$	RMSE	EAM	Referências
<b>ACP</b>								
0-10	1	a = 6,50, b = 6,72	$RP = 6,50 * \exp(-6,72 * \theta v)$	0,73	0,86	0,32	0,20	Busscher et al. (1997)
	2	c = 0,10, d = 1,55, e = 1,16	$RP = 0,10 * \theta v^{-1,55} * Ds^{-1,16}$	0,72	0,85	0,33	0,22	Busscher (1990)
	3	a = 1,56, b = 0,24, c = 6,72	$RP = \exp(1,56 + 0,24 * Ds + 6,72 * \theta v)$	0,73	0,86	0,32	0,20	Jakobsen e Dexter (1987)
	4	a = 432, n = 5,77, b = 6,72 a = 24,60, b = 9,36	$RP = 4,32 * (Ds/Dp) 5,77 * \exp(-6,72 * \theta v)$ $RP = 24,60 * \exp(-9,36 * \theta v)$	0,73 0,69	0,86 0,83	0,32 1,01	0,20 0,76	Upadhyaya et al. (1982) ''
10-20	1	c = 0,07, d = 2,20, e = 1,02	$RP = 0,07 * \theta v^{-2,20} * Ds^{-1,02}$	0,70	0,84	0,99	0,73	''
	2	a = 2,80, b = 0,29, c = 9,37	$RP = \exp(2,80 + 0,29 * Ds + 9,37 * \theta v)$	0,69	0,83	1,01	0,76	''
	3	a = 458,07, n = 4,63, b = 9,37 a = 56,22, b = 9,78	$RP = 458,07 * (Ds/Dp) 4,63 * \exp(-9,37 * \theta v)$ $RP = 56,22 * \exp(-9,78 * \theta v)$	0,69 0,75	0,83 0,87	1,01 1,76	0,76 1,50	'' ''
20-30	1	c = 0,18, d = 2,07, e = 1,07	$RP = 0,18 * \theta v^{-2,07} * Ds^{-1,07}$	0,75	0,86	1,80	1,50	''
	2	a = 3,58, b = 0,30, c = 9,78	$RP = \exp(3,58 + 0,30 * Ds + 9,78 * \theta v)$	0,75	0,87	1,76	1,50	''
	3	a = 506,95, n = 3,78, b = 9,78	$RP = 506,95 * (Ds/Dp) 3,78 * \exp(-9,78 * \theta v)$	0,75	0,87	1,76	1,50	''
<b>CAR</b>								
0-10	1	a = 16,34, b = 7,79	$RP = 16,34 * \exp(-7,79 * \theta v)$	0,90	0,95	0,35	0,26	Busscher et al. (1997)
	2	c = 0,09, d = 1,92, e = 1,11	$RP = 0,09 * \theta v^{-1,92} * Ds^{-1,11}$	0,90	0,95	0,34	0,25	Busscher (1990)
	3	a = 2,37, b = 0,28, c = 7,79	$RP = \exp(2,37 + 0,28 * Ds + 7,79 * \theta v)$	0,90	0,95	0,35	0,26	Jakobsen e Dexter (1987)
	4	a = 424,46, n = 6,07, b = 7,79 a = 195,60, b = 14,80	$RP = 424,46 * (Ds/Dp) 6,07 * \exp(-7,79 * \theta v)$ $RP = 195,60 * \exp(-14,80 * \theta v)$	0,90 0,65	0,95 0,81	0,35 1,55	0,26 1,11	Upadhyaya et al. (1982) ''
10-20	1	c = 0,03, d = 3,56, e = 0,44	$RP = 0,03 * \theta v^{-3,56} * Ds^{-0,44}$	0,63	0,80	1,59	1,12	''
	2	a = 4,79, b = 0,32, c = 14,79	$RP = \exp(4,79 + 0,32 * Ds + 14,79 * \theta v)$	0,65	0,81	1,55	1,11	''
	3	a = 574,50, n = 1,92, b = 14,80 a = 1054,69, b = 18,98	$RP = 574,50 * (Ds/Dp) 1,92 * \exp(-14,80 * \theta v)$ $RP = 1054,69 * \exp(-18,98 * \theta v)$	0,65 0,87	0,81 0,93	1,55 1,33	1,11 0,99	'' ''
20-30	1	c = 0,01, d = 5,06, e = 0,00	$RP = 0,01 * \theta v^{-5,06} * Ds^{-0,00}$	0,86	0,93	1,39	1,05	''
	2	a = 6,46, b = 0,33, c = 18,98	$RP = \exp(6,46 + 0,33 * Ds + 18,98 * \theta v)$	0,87	0,93	1,33	0,99	''
	3	a = 1054,69, n = 0,00, b = 18,98	$RP = 1054,69 * (Ds/Dp) 0,00 * \exp(-18,98 * \theta v)$	0,87	0,93	1,33	0,99	''

## Continuação da Tabela 3.

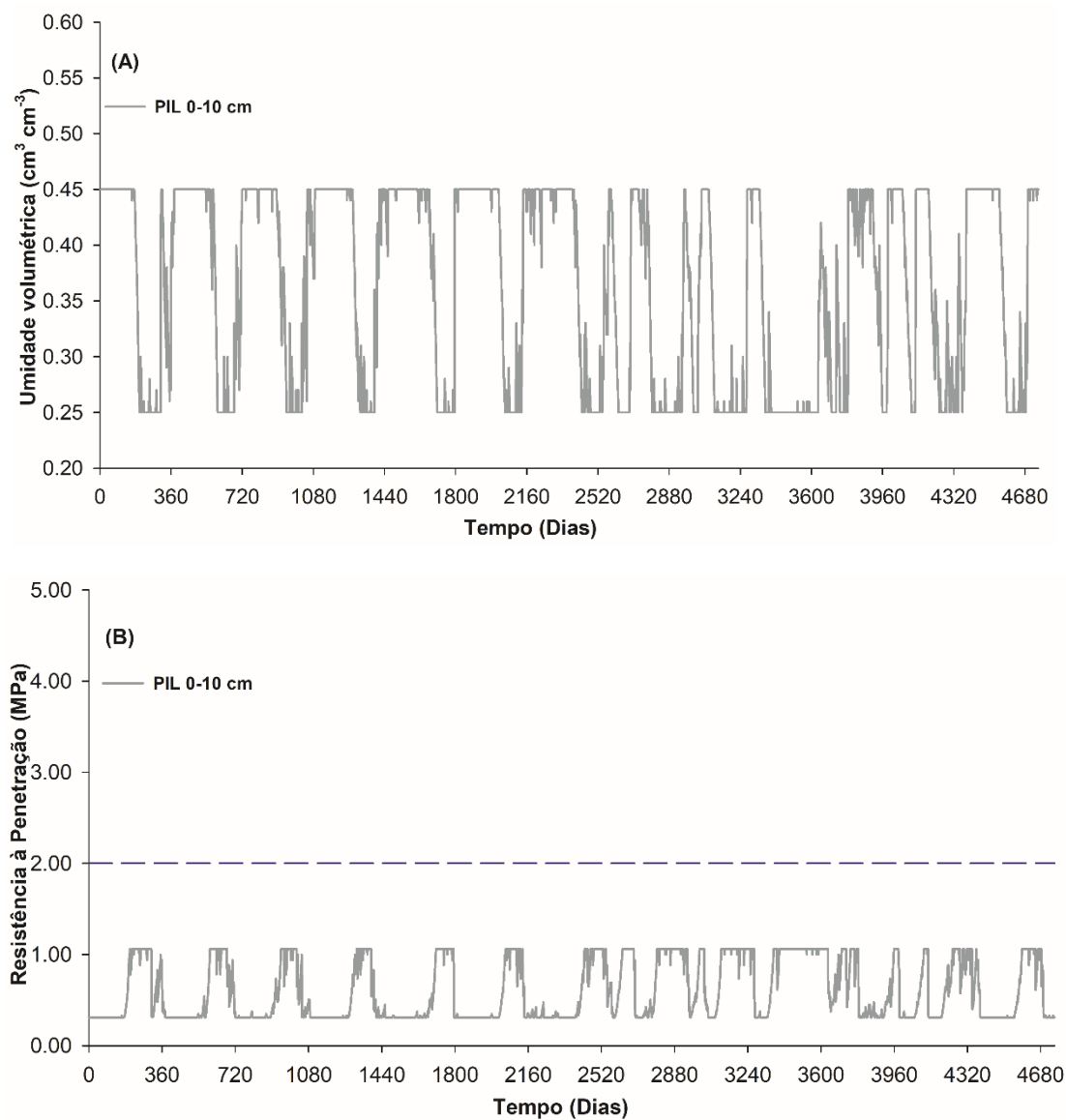
PIL								
	1	a = 4,91, b = 6,13	$RP = 4,91 * \exp(-6,13 * \theta v)$	0,72	0,85	0,30	0,23	Busscher et al. (1997)
	2	c = 0,10, d = 1,50, e = 1,15	$RP = 0,10 * \theta v^{-1,50} * Ds^{-1,15}$	0,72	0,85	0,29	0,22	Busscher (1990)
	3	a = 1,30, b = 0,24, c = 6,13	$RP = \exp(1,30 + 0,24 * Ds + 6,13 * \theta v)$	0,72	0,85	0,30	0,23	Jakobsen e Dexter (1987)
0-10	4	a = 430,83, n = 5,83, b = 6,13	$RP = 430,83 * (Ds/Dp) 5,83 * \exp(-6,13 * \theta v)$	0,72	0,85	0,30	0,23	Upadhyaya et al. (1982)
	1	a = 50,93, b = 12,01	$RP = 50,93 * \exp(-12,01 * \theta v)$	0,77	0,88	0,98	0,70	' "
	2	c = 0,04, d = 2,91, e = 0,41	$RP = 0,04 * \theta v^{-2,91} * Ds^{-0,41}$	0,77	0,88	0,98	0,71	' "
	3	a = 3,49, b = 0,30, c = 12,01	$RP = \exp(3,49 + 0,30 * Ds + 12,01 * \theta v)$	0,77	0,88	0,98	0,70	' "
10-20	4	a = 485,58, n = 3,74, b = 12,01	$RP = 485,58 * (Ds/Dp) 3,74 * \exp(-12,01 * \theta v)$	0,77	0,88	0,98	0,70	' "
	1	a = 29,28, b = 7,73	$RP = 29,28 * \exp(-7,73 * \theta v)$	0,72	0,85	1,18	1,04	' "
	2	c = 0,26, d = 1,85, e = 0,47	$RP = 0,26 * \theta v^{-1,85} * Ds^{-0,47}$	0,73	0,86	1,16	1,02	' "
	3	a = 2,91, b = 0,32, c = 7,73	$RP = \exp(2,91 + 0,32 * Ds + 7,73 * \theta v)$	0,72	0,85	1,18	1,04	' "
20-30	4	a = 372,56, n = 4,37, b = 7,73	$RP = 372,56 * (Ds/Dp) 4,37 * \exp(-7,73 * \theta v)$	0,72	0,85	1,18	1,04	' "
DIV								
	1	a = 2,71, b = 3,49	$RP = 2,71 * \exp(-3,49 * \theta v)$	0,80	0,89	0,17	0,11	Busscher et al. (1997)
	2	c = 0,15, d = 1,05, e = 1,89	$RP = 0,15 * \theta v^{-1,05} * Ds^{-1,89}$	0,80	0,90	0,17	0,11	Busscher (1990)
	3	a = 0,72, b = 0,21, c = 3,49	$RP = \exp(0,72 + 0,21 * Ds + 3,49 * \theta v)$	0,80	0,89	0,17	0,11	Jakobsen e Dexter (1987)
0-10	4	a = 405,43 n = 6,96, b = 3,49	$RP = 405,43 * (Ds/Dp) 6,96 * \exp(-3,49 * \theta v)$	0,80	0,89	0,17	0,11	Upadhyaya et al. (1982)
	1	a = 10,19 b = 6,01	$RP = 10,19 * \exp(-6,01 * \theta v)$	0,71	0,85	0,50	0,39	' "
	2	c = 0,15, d = 1,59, e = 1,23	$RP = 0,15 * \theta v^{-1,59} * Ds^{-1,23}$	0,73	0,83	0,52	0,40	' "
	3	a = 1,93, b = 0,27, c = 6,01	$RP = \exp(1,93 + 0,27 * Ds + 6,01 * \theta v)$	0,71	0,85	0,50	0,39	' "
10-20	4	a = 414,94 n = 6,01, b = 6,01	$RP = 414,94 * (Ds/Dp) 6,01 * \exp(-6,01 * \theta v)$	0,71	0,85	0,50	0,39	' "
	1	a = 94,02 b = 11,26	$RP = 94,02 * \exp(-11,26 * \theta v)$	0,87	0,93	0,71	0,60	' "
	2	c = 0,07, d = 3,14, e = 0,01	$RP = 0,07 * \theta v^{-3,14} * Ds^{-0,01}$	0,87	0,93	0,70	0,59	' "
	3	a = 4,04, b = 0,34, c = 11,26	$RP = \exp(4,04 + 0,34 * Ds + 11,26 * \theta v)$	0,87	0,93	0,71	0,60	' "
20-30	4	a = 439,78 n = 2,65, b = 11,26	$RP = 439,78 * (Ds/Dp) 2,65 * \exp(-11,26 * \theta v)$	0,87	0,93	0,71	0,60	' "



**Figura 3** - Precipitação (A) e evaporação potencial (ETo) (B) diárias no município de Tomé-Açu, Estado do Pará, no período de 2008-2020.

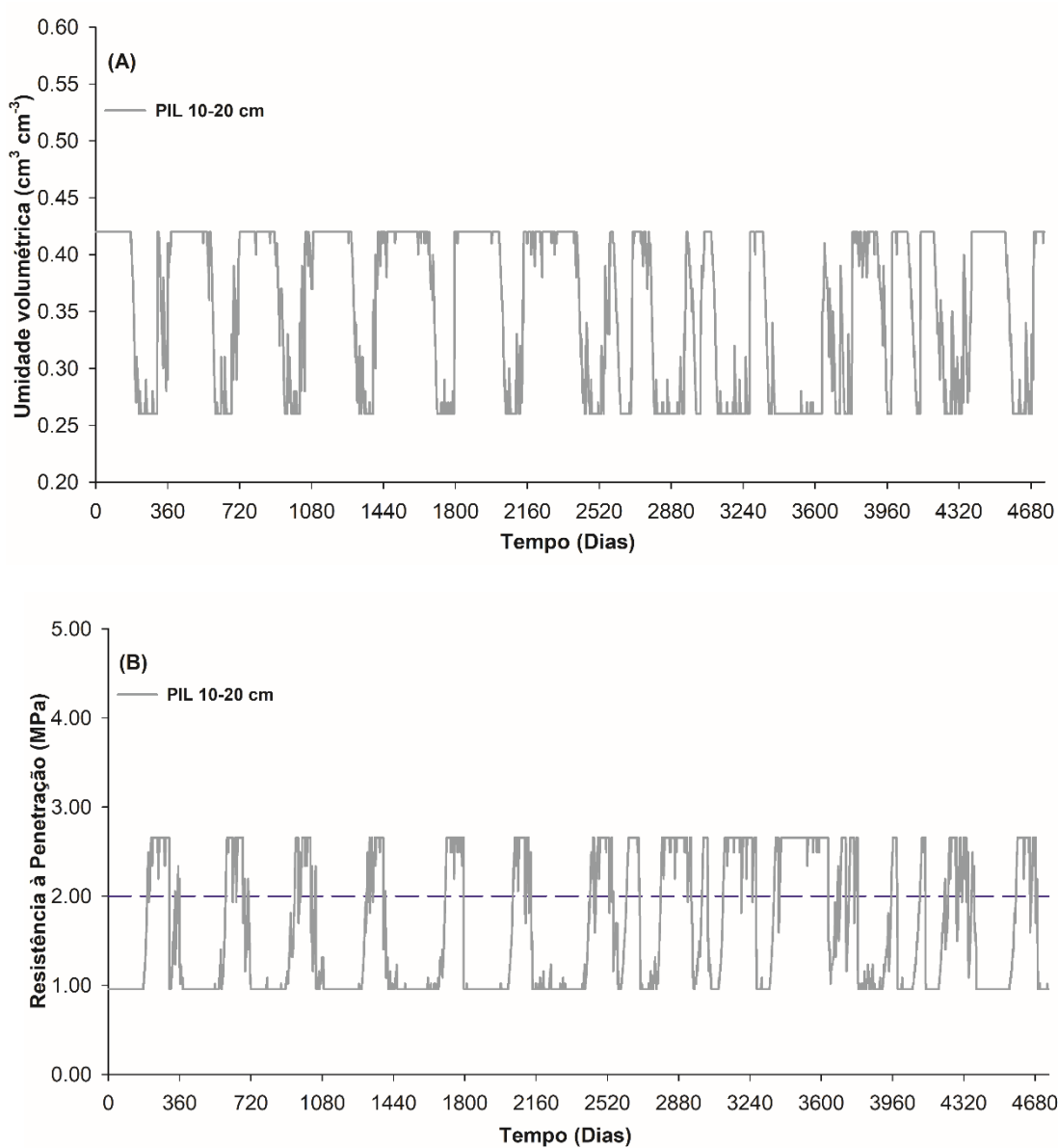


**Figura 4** - Umidade volumétrica (A) e resistência à penetração (B) na camada 0-10 cm na zona pilha de folhas, de um sistema agroflorestal com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental, Brasil. A linha tracejada indica o limite crítico de resistência à penetração (2 MPa) que afeta o crescimento de raízes (TORMENA et al., 2007).

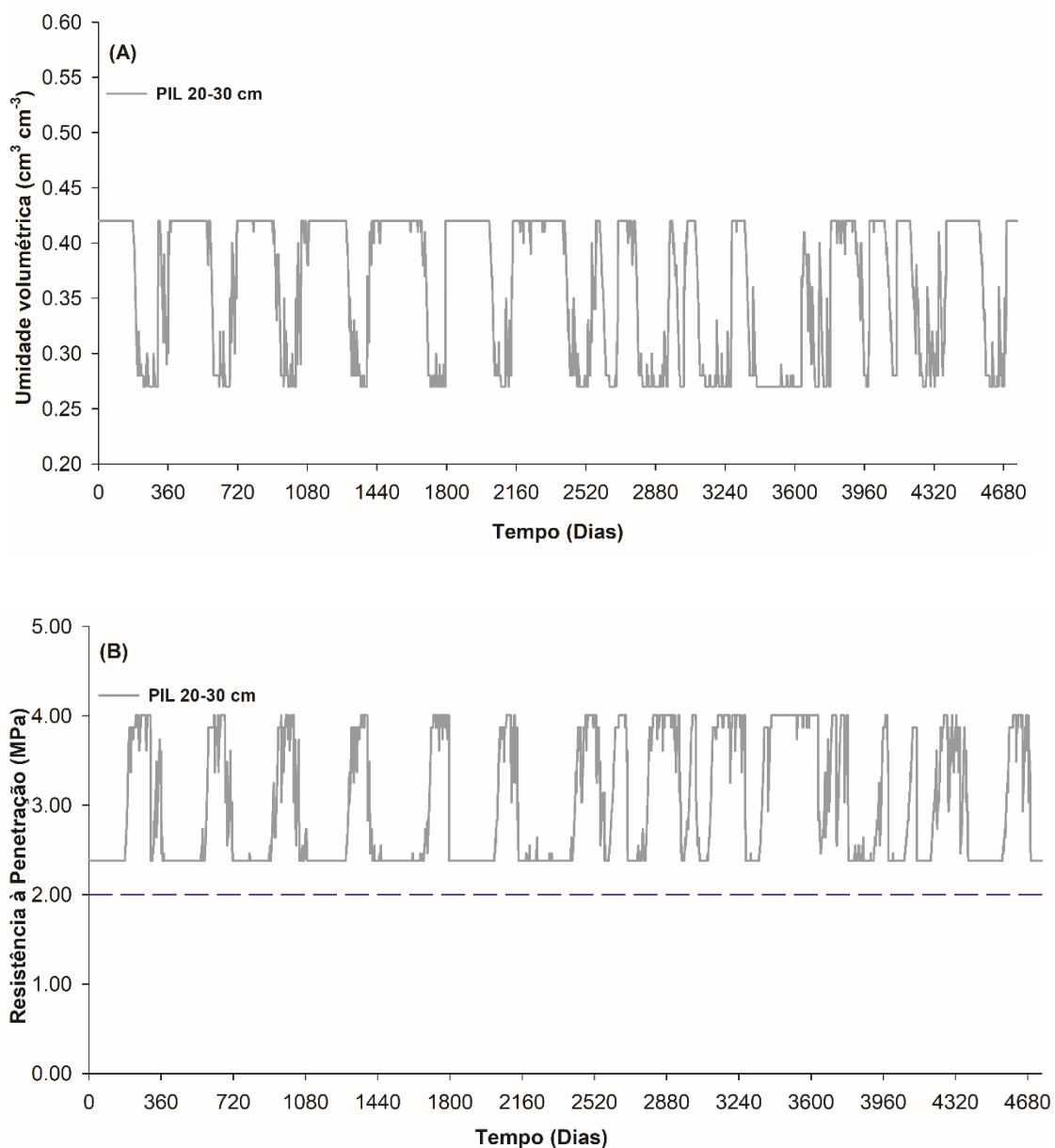




**Figura 5** - Umidade volumétrica (A) e resistência à penetração (B) na camada 10-20 cm na zona pilha de folhas, de um sistema agroflorestal com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental, Brasil. A linha tracejada indica o limite crítico de resistência à penetração (2 MPa) que afeta o crescimento de raízes (TORMENA et al., 2007).



**Figura 6** - Umidade volumétrica (A) e resistência à penetração (B) na camada 20-30 cm na zona pilha de folhas, de um sistema agroflorestal com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental, Brasil. A linha tracejada indica o limite crítico de resistência à penetração (2 MPa) que afeta o crescimento de raízes (TORMENA et al., 2007).



**ANEXO A - SISTEMA AGROFLORESTAL MENOS DIVERSIFICADO**

**Fonte:** Raimundo Leonardo L. de Oliveira.

**ANEXO B - SISTEMA AGROFLORESTAL MAIS DIVERSIFICADO**

**Fonte:** Raimundo Leonardo L. de Oliveira.