



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**GERSON CARLOS PINTO GLORIA**

**Alocação de biomassa e a distribuição de raízes do híbrido  
interespecífico de palma de óleo (*Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*)**

**BELÉM – PARÁ  
2020**



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**GERSON CARLOS PINTO GLORIA**

**Alocação de biomassa e a distribuição de raízes do híbrido  
interespecífico de palma de óleo ( *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis* )**

Trabalho apresentado à  
Universidade Federal Rural da  
Amazônia, como parte das  
exigências do Programa de Pós  
Graduação em Agronomia para  
obtenção do título de doutorado.

Orientador: Dr. Steel Silva Vasconcelos

**BELÉM - PARÁ**

**2020**

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

---

GLORIA, GERSON CARLOS PINTO

Alocação de biomassa e a distribuição de raízes do híbrido interespecífico de palma de óleo (*Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*) / GERSON CARLOS PINTO GLORIA. - 2020.

63 f. : il. color.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2020.

Orientador: Prof. Dr. STEEL SILVA VASCONCELOS

1. BIOMASSA DE RAIZES. 2. ECOFISIOLOGIA. 3. DENDÊ. I. VASCONCELOS, STEEL SILVA , orient. II. Título

CDD 633.851

---


**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**GERSON CARLOS PINTO GLORIA**

**Alocação de biomassa e a distribuição de raízes do híbrido  
interespecífico de palma de óleo (*Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*)**


Trabalho apresentado 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.

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 STEEL SILVA VASCONCELOS  
Data: 01/04/2023 16:14:48-0300  
Verifique em <https://validar.itf.gov.br>

---

**Dr. Steel Silva Vasconcelos - Orientador**  
**Embrapa Amazônia Oriental**

Documento assinado digitalmente  
 MICHEL KEISUKE SATO  
Data: 01/04/2023 20:26:28-0300  
Verifique em <https://validar.itf.gov.br>

---


**Dr. Michel Keisuke Sato – 1º Examinador**  
**Instituto Federal do Pará**

  
Augusto José Silva Pedroso

Assinado de forma digital por  
Augusto José Silva Pedroso


---

**Dr. Augusto José Silva Pedroso – 2º Examinador**

**Instituto Federal do Pará**  
Documento assinado digitalmente  
 MARIA DE LOURDES PINHEIRO RUIVO  
Data: 03/04/2023 10:23:17-0300  
Verifique em <https://validar.itf.gov.br>

---

**Dra. Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo – 3º Examinador**  
**Museu Paraense Emílio Goeldi**

Documento assinado digitalmente  
 GILSON SERGIO BASTOS DE MATOS  
Data: 03/04/2023 09:49:33-0300  
Verifique em <https://validar.itf.gov.br>

---

**Dr. Gilson Sergio Bastos de Matos – 4º Examinador**  
**Universidade Federal Rural da Amazônia**

***Dedico***

*À minha família e aos meus amigos,  
e, em especial, à minha esposa Kelly Ferreira, minha mãe Hilma Andrade Pinto e à minha  
filha Luana Vieira Glória.*

## AGRADECIMENTOS

A DEUS, por me conceder força e sabedoria;

À minha esposa Kelly Ferreira, por todo amor, carinho, dedicação e ser a personificação do amor de Deus na minha vida. Te amo.

A meus sogros, Rita Ferreira e José Calazans, por todo carinho e atenção.

À minha mãe, Hilma Andrade Pinto, por seu amor e suas orações em meu favor.

À minha Filha, Luana Vieira Gloria, cujo tempo de sua companhia foi sacrificado para obter esse título. Isto é por você.

Ao meu orientador, Dr. Steel Silva Vasconcelos, pelos ensinamentos repassados e pela orientação no desenvolvimento deste trabalho, além da paciência e oportunidade de desenvolver esta pesquisa.

Aos amigos Marcos Albuquerque, Malco da Luz, Michel Lima, Daniel Monteiro, Daniel Maramaldo, Fábio Marmith, Antônio Maues Junior e Leandro Melo, Priscila Sampaio e Rafael Sampaio, que em todos os momentos estiveram me apoiando.

Aos meus irmãos, Gilson Gloria, Luiz Carlos Gloria, Luscélio Gloria, José Carlos Junior, Luscilene Gloria, Lucicleide Gloria e Brenda Gloria, e a meu Pai José Carlos Barbosa Gloria.

Aos amigos do LASS: Carlos Dias, Gisele Nerino, Fabiola Fernandes, Helen Ramos, Liliane Cunha, Raissa Lopes, Cléo Souza, Ivanildo Trindade e Saime Rodrigues.

Aos estagiários da equipe de biomassa de raízes: Ramon Garcia, José Thiago Mendonça, Rodrigo Freitas, Dejjane Silva, Pamela Cornélio, Icaro Santos, Debora Carvalhaes, Álex Macêdo, Erika Monroe, Claudilene Lopes, Jennifer Silva, Adriana Sena, Crislayne Pacheco, Deborah Teixeira, Ingrid Lobato, Jessyca Camilly, Mylena Manso, Prisco Aranha, Rebeca Duarte, Marcia Pinheiro, Marli dos Santos, Luan da Silva, Laureane Raiol, José Batista, Erika Pacheco, Darlan de Sousa, Daniela da Silva, Ivan Abreu, Milton Sousa, Ivo da Costa e em especial a Juciene Amador.

Aos amigos que ajudaram nas coletas: Everson Lima, Luiz Carlos Neves, Duber Labán, Henry Mcarter, Sandro Chaves e Khety Holanda.

A Marborges S/A, pela concessão da área para a pesquisa, em especial a seus colaboradores: Antônio José de Abreu Pina, Lucivaldo, Raimundo Nonato, Aurélio, Luiz Fernando, Onofre e Carlos Quaresma. Verdadeiros guerreiros.

À CAPES, pela concessão da bolsa.

À FAPESPA, pelo financiamento do projeto.

À UFRA e ao programa de Pós Graduação em Agronomia, pela oportunidade e formação concedida.

Aos membros da banca, Dr. Marcelo Magalhães, Dr. Augusto Pedroso, Dra. Maria de Lourdes e Dr. Gilson Matos.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>Contextualização</b> .....	<b>1</b>
<b>referências</b> .....	<b>3</b>
<b>Capítulo 1.</b>	
<b>Accuracy of oil palm root length measuring methods</b> .....	<b>5</b>
Introduction .....	6
Materials and methods.....	6
Results and discussion .....	8
Conclusions .....	11
References .....	11
<b>Capítulo 2.</b>	
<b>Root morphological traits of oil palm genotypes with differential resistance to fatal yellowing</b> .....	<b>13</b>
Highlights .....	13
Abstract .....	13
Resumo .....	13
Introduction .....	14
Material and methods .....	15
Results and discussion .....	17
Conclusions .....	23
References .....	24
<b>Capítulo 3.</b>	
<b>Distribuição de biomassa em plantio de híbrido interespecífico de palma de óleo</b> .....	<b>28</b>
Introdução .....	29
Material e métodos.....	30
Caracterização da área .....	30
Histórico da área .....	31
Coleta de raízes .....	32
Análise estatística .....	36
Resultados e discussão .....	36

Conclusão .....	41
Referências.....	52



## RESUMO

O Brasil possui uma extensa área com clima e solo aptos ao plantio de palma de óleo. No entanto, a produção em parte desta área tem sido limitada pela ocorrência da anomalia Amarelecimento Fatal (AF), cujo sintoma inicial é o apodrecimento de raízes de absorção. Esse sintoma pode ser mais severo em materiais genéticos de palma de óleo que apresentem sistema radicular reduzido. Avaliamos características morfológicas de raízes e parte aérea de mudas de três genótipos de palma de óleo com graus diferentes de resistência ao AF: Tenera (sensível), Caiuá (resistente) e Híbrido Interespecífico (resistente). O Híbrido Interespecífico apresentou valores de massa de raízes finas e muito finas superiores em relação ao Caiuá (155 e 99%, respectivamente) e Tenera (228 e 94%, respectivamente). O Híbrido Interespecífico também apresentou valores superiores de comprimento de raízes finas e muito finas em relação ao Caiuá (155 e 99% respectivamente) e Tenera (228 e 94% respectivamente). Em um outro estudo avaliamos a biomassa abaixo do solo em um plantio comercial de híbrido interespecífico de palma de óleo (*Elaeis oleifera* cortés x *Elaeis guineensis* jacq.), cultivar BRS Manicoré, no município de Moju, nordeste do estado do Pará. Amostras de raízes foram obtidas por meio de coleta de monólitos em trincheiras com 4 metros de comprimento, 50 cm de largura e 290 cm de profundidade. Foram coletados monólitos em 8 camadas (2 – 15, 2 – 30 e 4 de 50 cm de profundidade) e em cada camada, foram coletados 8 monólitos medindo 50 cm de comprimento, 30 de largura e a altura de acordo com a camada coletada. Em laboratório, as raízes foram classificadas de acordo com seu diâmetro em primárias ( $\geq 5,0$  mm), secundárias (1– 4,9 mm), terciárias (0,5 – 0,9 mm) e quaternárias (0,25 – 0,49 mm). A profundidade de 15-30 cm concentra mais de 50% da DMS total (50,77% TP e 59,91% TC), e destes, 81,49% da DMS é de raízes primárias. As terciárias representam 8,96% do total da DMS de TP e 4,85% de TC e a quantidade de raízes quaternárias na região entre plantas é 78,05% maior do que a quantidade encontrada na região de carreamento. O cultivo de palma de óleo com 8 anos de idade apresenta uma biomassa total de raízes superior à de culturas sazonais, vegetação secundária, cultivo Tradicional, cultivo de Maracujá e pimenta do reino.

**Palavras-chave:** Densidade de raízes; Dendê; Monólito; Amarelecimento Fatal

## Contextualização

Na Amazônia, a necessidade de se planejar um sistema de gestão territorial, levando em consideração a conservação de seus recursos naturais, e que o desenvolvimento social e econômico local possa ser beneficiado com a atividade agrícola, tem sido um dos grandes desafios da ciência (Vieira et al., 2005). Uma estratégia que vem sendo debatida refere-se ao plantio de espécies florestais e/ou culturas perenes em áreas consideradas degradadas, como uma forma eficaz de melhorar a formação de um reservatório de carbono no solo. Aproximadamente 39,4% da área total de expansão da palma no Brasil entre os anos de 1989 e 2013 teve origem na conversão direta de floresta (Vijay et al., 2016). No entanto, a partir do ano de 1999 houve um forte declínio nesta conversão de uso da terra, com praticamente nenhum desmatamento direto de floresta primária para dendeicultura entre 2004 e 2008. Neste período, 68% da expansão ocorreu a partir da conversão de pastos em palma (Venturieri, 2012; Lange, 2012).

Quando ocorre a substituição de uma floresta pelo cultivo de palma de óleo, verifica-se, nos primeiros 4 anos, uma queda no conteúdo de carbono no solo nas camadas superiores (0-30 cm), e essa taxa só estabiliza quando a cultura atinge idade de 9 anos, onde há uma recomposição do estoque de carbono do solo, atingindo entre 55 e 65% do valor inicial, ou seja, antes da remoção da área de floresta (Lamade & Bouillet., 2005). Dentre os estudos sobre os estoques de carbono em áreas de cultivo de palma de óleo (Lamade & Setiyo, 2002; Raich, 1998; Nouvellon et al., 2004; Roupsard et al., 2002), existe uma lacuna considerável a ser preenchida de informações sobre a biomassa abaixo do solo e a distribuição do sistema radicular ao longo do perfil. Os trabalhos desenvolvidos no Brasil a respeito da biomassa para esta cultura (Cruz Filho, 2012; Sanquetta et al., 2015) não quantificaram a biomassa abaixo do solo.

A palma de óleo é uma oleaginosa de grande importância para a economia dos países exportadores de óleo vegetal, apresentando uma das maiores produtividades de óleo vegetal conhecidas no mundo, com rendimento de 4 a 6 toneladas de óleo/ha/ano (Muller et al., 2006; Moura, 2008). Como o melhor substituto para as gorduras trans, o óleo de palma é usado na indústria de alimentos para a fabricação de margarina, biscoitos, tortas e sorvetes, além de haver seu também na indústria de higiene e limpeza, como por exemplo, na produção de cosméticos, sabões e detergentes. Na indústria química, é um dos componentes de lubrificantes, óleos, glicerina e vários tipos de ácidos (Corley & Tinker, 2016).

A Amazônia Brasileira apresenta condições de solo e clima favoráveis ao cultivo da palma de óleo e concentra, em seu território, 91% do total de área plantada dessa cultura

no país. O Brasil é o quinto maior produtor de óleo de palma (Abrapalma, 2019) e produz anualmente cerca de 360.000 ton de óleo de palma e 30.000 ton de óleo de palmiste. Esse volume de produção é insuficiente para atender à demanda interna — 506.071 ton e 233.000 ton, respectivamente (MAPA 2018). Portanto, há grande necessidade de expandir o cultivo de palma de óleo para minimizar a forte dependência das importações.

As estimativas do consumo interno de óleo de palma bruto no Brasil são de aproximadamente 520.000 t óleo/ano e, para o óleo de palmiste, cerca de 200.000 t óleo/ano (MDIC, 2012). No Brasil, a estimativa da área plantada em 2015 era de 194.920, ha dos quais 9.507 ha são de Híbrido Interespecífico (OxG) (Homma et al., 2015), distribuídos principalmente na Região Norte e uma pequena parcela na região nordeste. Mais de 95% da produção nacional das áreas cultivadas de palma de óleo no país está concentrada no estado do Pará (Monteiro, 2013).

A produção de óleo de palma no Pará é favorecida por condições edafoclimáticas adequadas e incentivos ligados à legislação e a entidades públicas e privadas que promovem apoio técnico e financeiro. Nesse sentido, destaca-se o município de Tailândia como o maior produtor no estado (37,03%), seguido de Tomé-Açú (21,10%), Concordia do Pará (10,85%), Acará (8,26%) e Moju (5,55%), os quais, juntos, totalizam 82,79% do total da produção dessa cultura no Pará (Sedap, 2020).

O amarelecimento fatal (AF) é uma anomalia que ocorre em plantios de palma de óleo, causando sintomas que evoluem ao longo do tempo, incluindo amarelecimento dos folíolos basais das folhas intermediárias e, posteriormente, o surgimento de necroses nas extremidades dos folíolos, podendo evoluir para uma seca total dessas folhas mais jovens (Trindade et al., 2005). Uma alternativa que tem sido praticada por algumas empresas para superar as limitações causadas pelo AF é o uso de cultivares resistentes à anomalia, dentre elas, o híbrido interespecífico (HIE) desenvolvido pela Embrapa, cultivar BRS Manicoré, (Cunha & Lopes, 2010). As cultivares de HIE, além da tolerância ao AF, podem apresentar produção de cachos equivalente ou superior aos valores de produção descritos na literatura para cultivares de dendezeiro (Santos et al., 2015).

Dentre as metodologias voltadas para o estudo de raízes o método dos monólitos sempre foi considerado como sendo uma metodologia padrão (Park et al., 2007). Muito útil em estudos sobre morfologia e distribuição de raízes finas (entre 2 e 1 mm) no perfil do solo, além de permitir uma avaliação completa contendo um maior volume de raízes por classe de diâmetro, entretanto, coleta de monólitos demanda muita mão-de-obra e tempo, o que geralmente dificulta a pesquisa (Böhm, 1979).

## Referências

- Abrapalma - Associação brasileira de produtores de óleo de palma. 2018. Retrospecto e projeções da palma de óleo no Brasil. 1-15.
- BÖHM, W. Methods of studying root systems. New York, Springer-Verlag, 1979.p.194.
- Corley, R.H.V., & Tinker, P.B. The Oil Palm: 5° Ed. Wileyblackwell. 2016. Clair,S.B.;
- Cruz Filho, D. Crescimento E Estoque De Carbono No Dendezeiro Híbrido Interespecífico Brs Manicore Em Função Da Idade, No Nordeste Paraense, Amazônia Oriental. Tese Apresentada À Universidade Federal Rural Da Amazônia; 2012 . P.93
- Cunha, A.C.M.C.M.; Paiva, H.N.; Xavier, A.; Otoni, W.C. Papel Da Nutrição Mineral Na Formação De Raízes Adventícias Em Plantas Lenhosas. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, N58, 2009, P.35-47. Disponível Em : [Http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/37636/1/Papel-Da-Nutricao-Mineral-Na-Formacao-De-Raizes-Adventicias-Em-Plantas-Lenhosas..Pdf](http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/37636/1/Papel-Da-Nutricao-Mineral-Na-Formacao-De-Raizes-Adventicias-Em-Plantas-Lenhosas..Pdf)
- Lamade, E.; Setiyo, I. Characterisation Of Carbon Pools And Dynamics For Oil Palm And Forest Ecosystems : Application To Environmental Evaluation. In : International Oil Palm Conference. Indonésie : Nusa Dua, Bali, 2002
- Lange, M.V. A Mudança Do Estoque De Carbono Por Transformação Da Terra E Seu Uso No Inventário De Ciclo De Vida De Produtos De Origem Renovável: Estudo Do Caso Da Possível Expansão Da Palmade Óleo Na Amazônia Legal Brasileira. Curitiba:Ufpr, 2012. 90p. Tese De Mestrado
- Ministério da agricultura pecuária e abastecimento - MAPA. Diagnóstico da produção sustentável da palma de óleo, 2018, p. 11-15. Disponível em: <http://www.abrapalma.org/pt/diagnostico-da-producao-sustentavel-da-palma-de-oleo/>
- Ministério Do Desenvolvimento, Indústria E Comércio Exterior. (Mdic). Exportação E Importação Mundial E Brasileira De Óleo De Dendê. Secretaria De Comércio Exterior. Sistema Aliceweb. 2012. (Documento Técnico).
- Monteiro, K. F. G. Análise De Indicadores De Sustentabilidade Socioambiental Em Diferentes Sistemas Produtivos Com Palma De Óleo No Estado Do Pará.Tese (Doutorado Em Ciências Agrárias/Agroecossistemas Da Amazônia) – Universidade Federal Rural Da Amazônia/Embrapa Amazônia Oriental, Belém,2013.205 P).
- Moura, J.I.L., Polinização Do Dendezeiro Por *Elaeidobius Subvittatus* Faust E *Elaeidobius Kamerunicus* Faust (Coleoptera, Curculionidae) No Sul Do Estado Da Bahia [Dissertation]. Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”, Jaboticabal (Sp). 2008
- Muller, A. A. A Embrapa Amazônia Oriental E O Agronegócio Do Dendê No Pará / Antonio Agostinho Müller, José Furlan Júnior, Pedro Celestino Filho. Embrapa Amazônia Oriental, 2006
- Nouvellon, Y.; Roupsard, O.; Bonnefond, Et Al. The Carbon Budget Of Eucalyptus And Coconut Plantations Estimated From Different Methods. In : Séminaire Carbone. Montpellier, 2004 ; (16-18 Novembre).
- PARK, B.B.; YANAI, R.D.; VADEBONCOEUR, M.A.; Hamburg, S.P.,. Estimating root biomass in rocky soils using pits, cores, and allometric equations. Soil Sci. Soc. Am. J. 71, 2007. 206–213.
- Raich, J.W. Aboveground Productivity And Soil Respiration In Three Hawaiian Rain Forests. For Ecol Manage 1998 ; 107 : 309-18

Roupsard, O.; Bonnefond, J.M.; Jourdan, C.; Carbon Sequestration By Coconut Plantations In Oceania (Vanuatu). In : 2nd Carboeurope Meeting, 4-8 March. Budapest : Hungary, 2002.

Sanquetta, C.R.; Netto, S.P.; Corte, A.P.D.; Rodrigues, A.L.; Behling, A. & Sanquetta, M.N.I. (2015) – Quantifying biomass and carbon stocks in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Northeastern Brazil. African Journal of Agricultural Research, vol. 10, n. 43, p. 4067-4075. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.9582>

Santos, R.S.S; Rocha, V.K.G; Silva, M.P; Cardoso, P.N; O Híbrido Interespecífico Entre O Dendzeiro E O Caiuê Como Agente De Sustentabilidade Da Cadeia Produtiva. Iv Simpósio De Estudos E Pesquisas Em Ciências Ambientais Na Amazônia . Belém-Pa. 18 A 20/11. 2015.

Sedap – Secretaria de Desenvolvimento Agropecuario e de Pesca, 2020. Panorama Agrícola do Pará 2015 / 2019. Disponível em: [http://www.sedap.pa.gov.br/sites/default/files/arquivos\\_dados\\_agropecuarios/PANORAMA%20AGR%C3%8DCOLA%20DO%20PAR%C3%81%20-%20Dend%C3%AA%20%28cacho%20de%20coco%29%20-%202019.pdf](http://www.sedap.pa.gov.br/sites/default/files/arquivos_dados_agropecuarios/PANORAMA%20AGR%C3%8DCOLA%20DO%20PAR%C3%81%20-%20Dend%C3%AA%20%28cacho%20de%20coco%29%20-%202019.pdf)

Trindade, D. R.; Poltronieri, L. S.; Furlan Júnior, J. Abordagem Sobre O Estado Atual Das Pesquisas Para A Identificação Do Agente Causal Do Amarelecimento Fatal Do Dendzeiro. In: Poltronieri, L. S.; Trindade, D. R.; Santos, I. P. Dos (Ed.). Pragas E Doenças De Cultivos Amazônicos. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2005. P. 441- 450.

Venturieri, A. “Programa De Mapeamento E Monitoramento Da Expansão Do Plantio De Palma De Óleo No Brasil”. Apresentação Na 8a Reunião Ordinária Da Câmara Setorial Da Cadeia Produtiva Da Palma De Óleo. Brasília, Df, 8 De Agosto De 2012.

Vieira, I. C. G.; Silva, J. M.; Toledo, P. M. Estratégias Para Evitar A Perda Da Biodiversidade Na Amazônia. Estudos Avançados, São Paulo, V. 19, N. 54, 2005 P.153- 164.

Vijay, V.; Pimm, S.L.; Jenkins, C.N.; Smith, S.J. The Impacts Of Oil Palm On Recent Deforestation And Biodiversity Loss. Plos One 11. P.19. 2016 Disponível Em: [Http://Journals.Plos.Org/Plosone/Article?Id=10.1371/Journal.Pone.0159668](http://Journals.Plos.Org/Plosone/Article?Id=10.1371/Journal.Pone.0159668)

# Accuracy of oil palm root length measuring methods

## Acurácia de métodos de medição do comprimento radicular de dendê

Gerson C. P. Glória<sup>1,\*</sup>, Juciene T. Amador<sup>2</sup> and Steel S. Vasconcelos<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal Rural da Amazônia, Programa de Pós-graduação em Agronomia, Avenida Presidente Tancredo Neves, nº 2501, CEP 66077-830 Belém, PA, Brazil

<sup>2</sup>Universidade Federal Rural da Amazônia, Engenharia Ambiental e Energias Renováveis, Avenida Presidente Tancredo Neves, nº 2501, CEP 66077-830 Belém, PA, Brazil

<sup>3</sup>Embrapa Amazônia Oriental, Laboratório de Análise de Sistemas Sustentáveis. Travessa Doutor Enéas Pinheiro, s/n°, CEP 66095-903 Belém, PA, Brazil (\*E-mail: gersoncarllos@hotmail.com)

<https://doi.org/10.19084/rca.18167>

Received/recebido: 2019.06.27

Accepted/aceite: 2020.01.31

### ABSTRACT

Length is an important variable to describe root architecture and growth, but root length (RL) measurement is extremely laborious and time-consuming. Image analysis methods can provide reliable and fast RL estimates; such tools have not been applied for oil palm, a globally relevant commodity. We tested two image analysis softwares (Safira and ImageJ) and the modified line-intersect method to estimate oil palm RL. We considered the manual measurement of RL as reference to infer about the accuracy of the image analysis and line-intersect methods. We sampled roots in an 10-yr-old oil palm plantation in eastern Amazon. We used the estimates from the image analysis to calculate a correction factor that was further applied to improve the RL estimates. We applied the Paired sample *t*-test ( $p < 0.05$ ) to separately test the original and corrected estimates of each method in relation to the reference. Although the original RL estimates of the image analysis and line-intersect showed limited accuracy, the correction factors improved the estimates of RL for ImageJ. We conclude that the ImageJ software is sufficiently accurate to estimate oil palm root length when specific root diameter correction factors are applied.

**Keywords:** *Elaeis guineensis*, image analysis, ImageJ, line-intersect method, Safira.

### RESUMO

Comprimento é uma importante variável para descrever a arquitetura e o crescimento de raízes, mas a medição do comprimento radicular (CR) é extremamente trabalhosa e demorada. Métodos de análise de imagens permitem estimativas confiáveis e rápidas de CR, mas estas ferramentas não foram ainda aplicadas ao dendê, uma commodity globalmente relevante. Testamos dois programas computacionais de análise de imagens (Safira e ImageJ) e o método da linha de interseção para estimar o CR de dendê. Consideramos a medição manual de CR como referência para inferir sobre a acurácia dos métodos de análise utilizados. Coletamos amostras de raízes em um plantio de dendê de 10 anos de idade na Amazônia oriental. Usamos as estimativas da análise de imagens para calcular um fator de correção que foi, subsequentemente, aplicado para melhorar as estimativas de CR. Aplicamos o teste *t* para amostras pareadas ( $p < 0.05$ ) para testar separadamente as estimativas originais e corrigidas de cada método em comparação com a referência. Embora os métodos de análise de imagens e linha de interseção apresentaram acurácia limitada, os fatores de correção melhoraram as estimativas de CR para o ImageJ. Concluímos que o software ImageJ é suficientemente acurado para estimar o comprimento de raízes de dendê quando fatores de correção específicos para cada classe diâmetro são aplicados.

**Palavras-chave:** *Elaeis guineensis*, análise de imagens, ImageJ, método da linha de interseção, Safira.

## INTRODUCTION

The root system is responsible for the uptake of soil water and nutrients, and plant physical support (Taiz *et al.*, 2017). Dry mass, surface area, and length are commonly measured to assess or model the efficiency of water and nutrient uptake by roots (Nye and Tinker, 1977); most measurements focus on the fine roots (diameter  $\leq 2$  mm) because of their high relevance in the uptake process (Schroth, 1999). However, the measurement of such root variables is extremely laborious and time-consuming (Böhm, 1979), and thus, there is a great need for research methods that minimize the effort and time spent in root studies.

Data on specific root length and surface area are very limited due to insufficiency of studies involving root length measurement. Related methods such as the line-intersect (Newman, 1966; Marsh, 1971; Tennant, 1979) and direct measurement (Ahlrichs *et al.*, 1990) are considered as standards for assessing root length, but they are laborious and time-consuming (Tennant, 1979) and present low accuracy because of human subjectivity (Judd *et al.*, 2015). The error in a direct measurement and line-intersect methods can range from 2 to 5% (Newman, 1966).

Automatic and semi-automatic methods that are based on the analysis of root images are more efficient than non-automatic (line-intersect and direct measurement) methods for estimating root length, area, and diameter (Vamerali *et al.*, 2003; Delory *et al.*, 2017). Image analysis softwares are used in automatic and semi-automatic methods, such as the Safira software, developed by the Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa), and the ImageJ software, developed by the National Institute of Health (NIH), USA. The few studies that assessed the accuracy of both Safira and ImageJ (Tanaka *et al.*, 1995; Costa *et al.*, 2014; Delory *et al.*, 2017) have focused on the fine roots of short-cycle crops, probably due to their agronomic relevance. Fewer related studies have focused on the coarse roots (diameter  $> 2$  mm) despite their significant contribution to the whole root system biomass and belowground carbon pool. In oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.), for example, coarse roots represent approximately 84% of the total root biomass (Gloria, 2016). Oil palm is a commodity of

African origin whose oil extracted from its fruits represents the main raw material of the oilseed industry in the world (Corley & Tinker, 2016). It accounts for 38.8% of all vegetable oil sold in the world, with a total of 70 million tons (between 2017 and 2018); Brazil supplies 0.72% of this amount (USDA, 2018).

The root architecture (Jourdan & Rey, 1996, 1997a, b) and biomass (Rees & Tinker, 1963; Corley *et al.*, 1971; Cuesta *et al.*, 1997; Jourdan *et al.*, 2000; Kiyono *et al.*, 2015; Sanquetta *et al.*, 2015) of oil palm have been relatively well studied. However, few studies have distinguished between root diameter classes (Corley & Tinker, 2016), and there is a still lack of estimates of oil palm root length (Yahya *et al.*, 2010). Thus, it is necessary to develop simple, accurate protocols to estimate the root length of the different root classes of oil palm. Here we assessed the accuracy of different methods to estimate them.

## MATERIALS AND METHODS

We conducted this study at the Laboratory of Sustainable Systems Analysis (LASS) of Embrapa Amazônia Oriental, Pará, Brazil, between August and October 2017. We used segments of oil palm roots, as well as electric and nylon wires of known diameters, to evaluate the accuracy of methods to estimate oil palm root length — one non-automatic method (line-intersect, Tennant) and two methods based on image analysis software (Safira and ImageJ).

We collected roots of an interspecific oil palm hybrid (*Elaeis guineensis* Jacq. x *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés) from a 10-yr-old commercial plantation (Marborges S/A) in the municipality of Moju, Pará, Brazil. The plants were arranged in an equilateral triangle with 9x9 m spacing. We collected one soil monolith (approximate dimensions: width = 0.5 m, length = 0.4 m, depth = 0.3 m) 1 m away from two individuals. We washed the soil samples in running water and stored the roots under refrigeration ( $\sim 5$  °C) for 24 h. Then we separated the roots according to diameter class into primary (5-10 mm), secondary (1-4.9 mm), tertiary (0.5-0.9 mm), and quaternary (0.2-0.49 mm) (adapted from Corley & Tinker, 2016).

After classification, we randomly selected 15 root segments (root segment pool) of each diameter class and cut the primary, secondary, and tertiary roots into sections of approximately 10 cm in length. Due to the absence of quaternary roots with length  $\geq 10$  cm, we picked the 15 longest sections (mean of 3.3 cm) of this root class. For each diameter class, we formed ten samples composed of five root segments each — randomly selected among the 15 root segments, with the replacement of segments to the root segment pool after measuring each sample (described below). Then we randomly selected the next sample and so on (sampling with replacement approach).

To determine the percent error variation of the root length estimates of Tennant, Safira, and ImageJ methods in relation to the reference one (direct measurement), we used wires with diameters of 6.9, 2.75, 0.75, and 0.35 mm which were respectively close to the intermediate value of the diameter range of the primary, secondary, tertiary, and quaternary roots. We used electric wires for the larger diameters (2.75 and 6.9 mm), and nylon wires for the other widths. We painted the wires with black automotive paint to standardize the color and enhance image contrast for scanning. Then we cut the wires into segments of approximately 10 cm in length. In the direct measurement (DM) method, considered as reference in this study, we measured the length of each wire or root segment to the nearest millimeter with a ruler.

In the line-intersect method (Tennant, 1975), we randomly arranged the samples (without root overlapping) on an A4 size paper sheet. We used 2x2 cm squared paper sheets for the primary roots and 6.9 mm diameter wires, and 1x1 cm sheets for the other diameter classes of roots and wires. We applied the equation for the primary roots and 6.9 mm diameter wires and the equation for the other diameter classes of roots and wires. For both equations, L is the total length, N is the number of intersects, and G is the grid unit (Tennant, 1975). We registered the time demanded to obtain the total length of each sample.

In the image analysis methods, we scanned the root and wire samples using a flatbed scanner (Canon, Pixma MP280) with 319 x 418 DPI resolution. Before scanning, we placed a 10 cm millimeter ruler next

to each sample to calibrate the scale in the software further. We converted each scanned image into a binary image. The average time spent for image acquisition and conversion into the binary was 1.3 min, which was added to the average time of analyses of each software. We analyzed the images using Safira V.1.1 (Jorge & Silva, 2010), developed by Embrapa, and the plugin Smartoot of ImageJ V.1.46 (ImageJ, 1997), developed by the National Institute of Health, USA (Figure 1).

For the ImageJ software, we used the pixel/cm information (obtained with the software calibration option and the ruler reference in the image) for calibration because this procedure resulted in higher accuracy compared to using a fixed, default resolution value. We used the following values: 31,500 pixels/cm for the primary, secondary, and tertiary roots; 23,802 pixels/cm for the quaternary roots; 23,601 pixels/cm for the 6.9 and 2.5 mm wires; 158,16 pixels/cm for the 0.7 mm wire; and 156,91 pixels/cm for the 0.35 mm wire. We noticed that the automatic drawing mode underestimated root length since parts of the segments of the tertiary and quaternary roots were not recognized as roots. For these root diameter classes, we used the Traceroot tool, which did not underestimate root length. We initially calibrated the Safira software using the reference scale (ruler) in each image. Then we adjusted the thresholds before running the analysis.

We applied the root estimates from both the Safira and ImageJ analyses to obtain correction factors (CF) of each root class, based on the following equation:

$$CF = \left( \frac{LR - LE}{LR} \right),$$

where LR is the real root length (determined by the manual method), and LE is the length estimated by the software. We then applied the equation

$$LC = LE + LE \times CF$$

to correct the root length, where LC is the corrected length. We then randomly selected another set of oil palm root segments (10 samples with five individual root images per sample) for image analysis using both Safira and ImageJ; we applied the correction factors to these estimates.



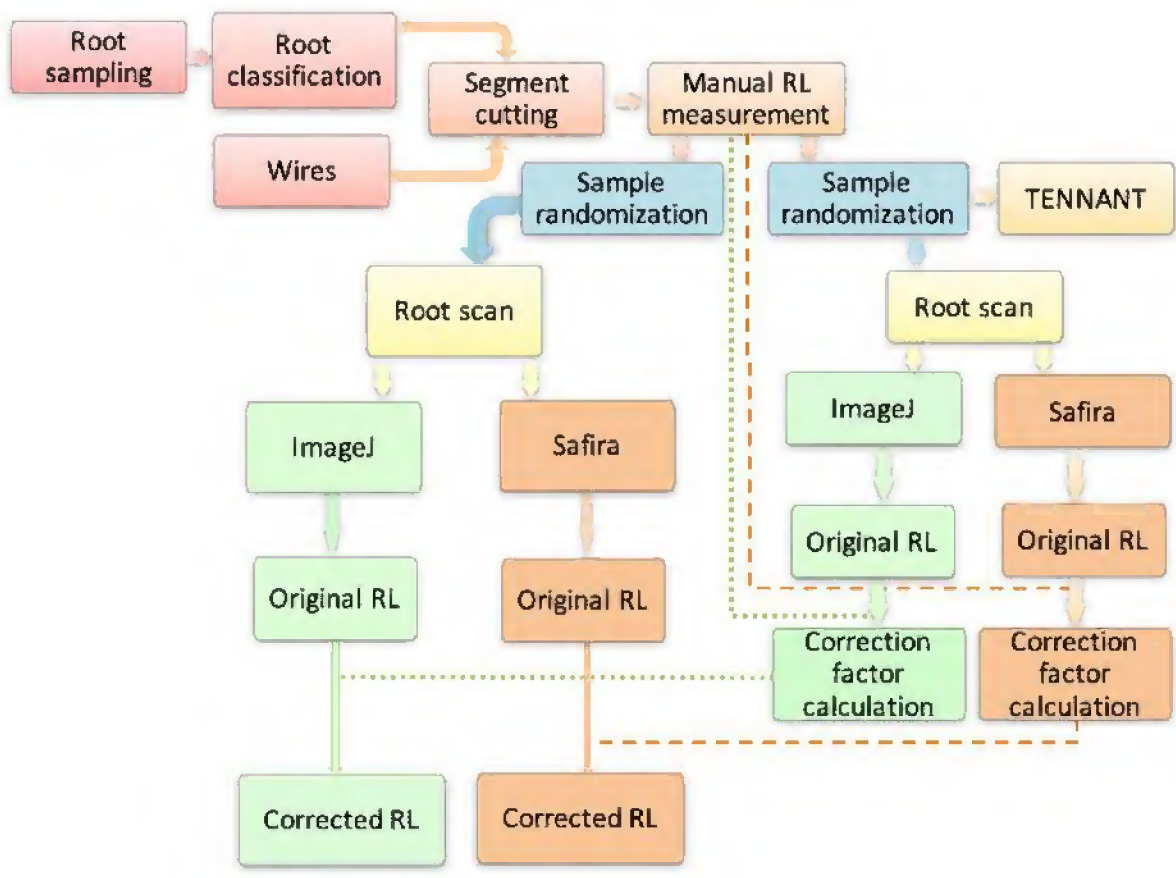


Figure 1 - Schematic flowchart of the root length (RL) analysis.

We applied the Paired sample *t*-test, with n=10 at 5% significance level, to compare each method individually (Tennant, Safira, ImageJ) against the reference (direct method). We used nonparametric statistics to analyze the corrected length of secondary and quaternary roots. We used the SigmaPlot 12.0 software for all statistical analysis.

**RESULTS AND DISCUSSION**

In general, the image analysis softwares (Safira and ImageJ) and the Tennant method showed limited accuracy to estimate root length. For some root diameter classes, estimates of these methods differed significantly from the results of the reference method. Root length values estimated by the Safira software differed significantly from the values determined by the reference method for all root

classes (Table 1). The average time spent to measure each root class ranged from 2 to 4 min using the Safira software. The ImageJ software was accurate to estimate the length of quaternary roots, but for the other root classes (primary, secondary, and tertiary), the estimates differed significantly from the results of the reference method. The time for analysis of each root class was approximately 5.3 to 10 min using the ImageJ software. The Tennant method did not differ from the reference method to estimate the length of tertiary and quaternary roots; the average analysis time varied between 1.00 and 1.20 min.

Few studies have analyzed the time spent for root analysis using the line-intersect method; we are not aware of related studies using Safira. The use of automatic drawing in ImageJ reduces root analysis time compared to other methods (Kimura

**Table 1** - Length of primary, secondary, tertiary, and quaternary oil palm roots determined manually (reference) and estimated by the line-intersect method (Tennant) and image analysis methods (Safira and ImageJ). Time refers to the total duration of processing and analysing the root samples

Method	Primary root		Secondary root		Tertiary root		Quaternary root	
	Length (cm) <sup>1</sup>	Time (min)	Length (cm)	Time (min)	Length (cm)	Time (min)	Length (cm)	Time (min)
Reference	51.06 ± 0.10	00:23.56	50.66 ± 0.04	00:29.07	50.59 ± 0.09	00:36.35	16.62 ± 0.21	00:55.60
Tennant	54.37 ± 1.20*	01:21.28	46.83 ± 0.43*	01:21.27	50.13 ± 0.59	01:24.39	16.66 ± 0.52	01:12.83
Safira	53.65 ± 0.49*	02:16.45	52.02 ± 0.19*	02:38.82	53.24 ± 0.20*	02:51.78	17.02 ± 0.17*	03:36.47
ImageJ	50.84 ± 0.16*	05:31.29	50.10 ± 0.06*	05:56.77	50.88 ± 0.12*	10:03.89	16.54 ± 0.20	07:52.47

<sup>1</sup>Length data are mean ± standard deviation (n=10).

Asterisks indicate significant difference between a method and the reference according to the Paired sample t-test at 5% significance level.

*et al.*, 1999; Delory *et al.*, 2017). However, the accuracy of root estimates with the ImageJ software may be strongly affected by the automatic drawing resource, leading to relative root length errors of 7% (Tanaka *et al.*, 1995). Thus, such trade-offs between automatic drawing (which is less time-consuming) and accuracy should be accounted for before selecting a root analysis protocol.

The accuracy of each method was also assessed based on estimates using wires. The estimate of the length of 0.35 mm wires using the Tennant method and the ImageJ software did not differ from the value estimated by the reference method (Table 2); however, the ImageJ underestimated length in 0.24% and the Tennant overestimated it in 0.66%. These results are consistent with another study that tested 0.3 mm diameter wires using ImageJ (Kimura *et al.*, 1999). Length estimates for the 6.9 mm diameter wires did not differ between the Safira software and the direct method (Table 2). For the intermediate diameters (0.75 and 2.5 mm), the non-direct methods (Tennant, Safira, ImageJ) differed from the direct method (Table 2).

However, the ImageJ software showed the lowest relative difference to the direct measurement for all root classes.

Percent error variation between analyses of wires and roots did not show a clear pattern (Table 3), that is, for a given root diameter class and its respective wire pattern, there was both over and under-estimation depending on the root length measuring method, as reported by Delory *et al.* (2017). In the Tennant method, the larger diameter range of the secondary roots (1.0-4.9 mm) may have caused the high relative error of root length, considering that such error did not occur with the respective wire standard (2.5 mm diameter). The Tennant method is subject to sources of errors that image analysis softwares does not present, such as the involuntary omission of line intersects, error in intercept interpretation using Tennant guidelines, operator fatigue, and variation between operators (Delory *et al.*, 2017). For example, operator variation may lead to a 10% error and different criteria of root arrangement may result in a 7% error (Bland & Mersarch, 1990).

**Table 2** - Wire length determined manually (reference) and estimated by the line-intersect method (Tennant) and image analysis methods (Safira and ImageJ). Error refers to the relative difference of each wire length value relative to the reference

Method	6.95 mm-wire		2.5 mm-wire		0.75 mm-wire		0.35 mm-wire	
	Length (cm) <sup>1</sup>	Error (%)	Length (cm)	Error (%)	Length (cm)	Error (%)	Length (cm)	Error (%)
Reference	50.2±0.05	-	50.00±0.00	-	50.00±0.00	-	50.11±0.02	-
Tennant	53.58±1.25*	6.7	51.54±0.65*	3.1	51.78±0.43*	3.6	50.44±0.49	0.7
Safira	50.21±0.22	0	53.56±0.50*	6.6	51.46±1.05*	2.4	52.32±0.20*	4.2
ImageJ	49.40±0.13*	-1.6	50.20±0.02*	0.4	49.70±0.02*	-0.6	49.99±0.09	-0.2

<sup>1</sup>Length data are mean ± standard deviation (n=10).

Asterisks identify results statistically different from the reference mean according to the Paired sample t-test at 5% significance level.

**Table 3** - Relative error associated with the length of oil palm roots and wires estimated by the line-intersect method (Tennant) and image analysis softwares (Safira, ImageJ). Negative and positive signs indicate underestimation or overestimation, respectively

Method	Primary root	6.5 mm-wire	Secondary root	2.5 mm-wire	Tertiary root	0.75 mm-wire	Quaternary root	0.35 mm-wire
	Error (%)		Error (%)		Error (%)		Error (%)	
Tennant	6.51	6.74	-7.55	3.08	-0.91	3.56	0.23	0.66
Safira	5.07	0.00	2.69	6.58	5.23	2.41	2.68	4.21
ImageJ	-0.43	-1.60	-1.09	0.40	0.56	-0.59	-0.48	-0.24

The correction factors did not entirely improve the accuracy of the Safira software (Table 4); the corrected length for primary (5-10 mm) and secondary (1-4.9 mm) roots differed statistically from those of the reference method. Thus, the use of correction factors to improve the accuracy of the Safira software is useful only when root diameters are in the range of 0.35-0.99 mm.

including the direct measurement (Table 1). However, in our study, we did not account for the time spent to separate the roots into different diameter classes. Such procedure is not necessarily required for the image analysis method using the ImageJ software, which may automatically classify the root segments into different root diameter intervals. In the direct measurement, a prior separation of roots in diameter classes (primary, second-

**Table 4** - Length of primary, secondary, tertiary, and quaternary oil palm roots determined by the reference method and estimated by image analysis softwares (Safira, ImageJ). Original and corrected length estimates are shown for both Safira and ImageJ

Root	Reference	Safira		ImageJ					
	Length (cm) <sup>1</sup>	Original length (cm)	Corrected length (cm)	<i>p</i>	%	Original length (cm)	Corrected length (cm)	<i>p</i>	%
Primary	51.13 ± 0.08	52.98 ± 0.36*	50.30 ± 0.34*	0.06	1.54	50.91 ± 0.07	51.13 ± 0.07	0.84	-0.03
Secondary	50.56 ± 0.05	54.43 ± 0.52*	52.97 ± 0.51*	0.08	4.37	50.37 ± 0.04*	50.81 ± 0.12	<0.05	0.49
Tertiary	50.63 ± 0.05	54.02 ± 0.17*	51.20 ± 0.16	0.01	1.13	51.08 ± 0.18*	50.79 ± 0.18	0.40	0.33
Quaternary	16.54 ± 0.23	16.68 ± 0.19*	16.24 ± 0.18	0.11	1.81	16.34 ± 0.24	16.40 ± 0.24	0.56	0.80

<sup>1</sup>Length data are mean ± standard deviation (n=10).

Asterisks indicate significant difference between means of an image analysis method and the reference according to the Paired sample *t*-test at 5% significance level.

ImageJ usually underestimates root length (Tanaka *et al.*, 1995). Our results showed underestimation of primary (0.43%), secondary (1.09%), and quaternary roots (0.38%), although tertiary root length was overestimated by 0.56%. Such variation led to reduced accuracy of uncorrected estimates of some root diameter classes (Table 4). After applying the correction factor (Table 5), none of the estimates using the ImageJ software differed from the values of the reference method (Table 4).

Despite the adequate accuracy of the ImageJ software, this tool showed the longest image analysis processing time in relation to the other methods,

ary, etc.) is necessary to reduce the variance in the length estimate due to root overlapping (Tennant, 1988). Thus, the time spent in the reference method was underestimated in this study.

**Table 5** - Correction factor for estimating oil palm root length using the ImageJ software. Negative and positive signs indicate underestimation or overestimation, respectively

Primary root	Secondary root	Tertiary root	Quaternary root
Correction factor (%L)			
-0.43	-1.09	0.56	-0.38

## CONCLUSIONS

The ImageJ software showed adequate accuracy to estimate the length of oil palm roots, provided that correction factors specific to each root diameter class are applied.

The line-intersect method and the Safira software are not accurate to estimate the length of oil palm root.

## REFERENCES

- Ahlich, J.L.; Karr, M.C.; Baligar, V.C. & Wright, R.J. (1979) – Rapid bioassay of aluminum toxicity in soil. *Plant and Soil*, vol. 122, p. 279-285. <https://doi.org/10.1007/BF02851986>
- Böhm, W. (1979) – *Methods of studying root systems*. New York, Springer-Verlag, p.194.
- Bland, W.L. & Mesarch, M.A. (1990) – Counting error in the line-intercept method of measuring root length. *Plant and Soil*, vol. 125, n. 1, p. 155-157. <https://doi.org/10.1007/BF00010758>
- Corley, R.H.V. & Tinker, P.B. (2016) – *The oil palm*. Oxford: Blackwell Science. 692p.
- Costa, M.C.G.; Cunha, I.M.L.; Jorge, L.A.C. & Araújo, I.C.S. (2014) – Public-Domain Software For Root Image Analysis. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 38, n. 5, p. 1359-1366. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000500001>
- Cuesta, R.R.; Pérez, S.B. & Rojas, E.A.P. (1997) – Root system distribution of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Tumaco, Colombia. *Palmas*, vol. 18, p. 9.
- Delory, B.M.; Weidlich, E.W.A.; Meder, L.; Lütje, A.; Duijnen, R.V.; Weidlich, R. & Temperton, V.M. (2017) – Accuracy and bias of methods used for root length measurements in functional root research. *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 8, n. 11, p. 1594-1606. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12771>
- Gloria, G.C.P. (2016) – *Biomassa de raízes em plantio de híbrido interespecífico de Palma de óleo no leste da Amazônia*. Tese de mestrado – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém. 54p.
- ImageJ (1997) – *Image processing and Analysis in Java*. [cit. 2017.05.30]. <https://imagej.nih.gov/ij/>
- Jorge, L.A.C. & Silva, D.J.C.B. (2010) – *SAFIRA: manual de utilização*. Embrapa Instrumentação Agropecuária. [www.cnpdia.embrapa.br](http://www.cnpdia.embrapa.br)
- Jourdan, C.; Ferriere-Michaux, N. & Perbal, G. (2000) – Root system architecture and gravitropism in the oil palm. *Annals of Botany*, vol. 85, n. 6, p. 861-868. <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1148>
- Jourdan, C. & Rey, H. (1996) – Oil palm root architecture: modelling and simulation. *Plantations, recherche,développement*. p.324-327.
- Jourdan, C. & Rey, H. (1997a) – Architecture and development of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root System. *Plant and Soil*, vol. 189, n. 1, p. 33-48. <https://doi.org/10.1023/A:1004290024473>
- Jourdan, C. & Rey, H. (1997b) – Modelling and simulation of the architecture and development of the oil-palm(*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. *Plant and Soil*, vol. 190, n. 2, p. 235-246. <https://doi.org/10.1023/A:1004218030608> Judd, L.A.;
- Jackson, B.E. & Fonteno, W.C. (2015) – Advancements in root growth measurement technologies and observation capabilities for container-grown plants. *Plants*, vol. 4, n. 3, p. 369-392. <https://doi.org/10.3390/plants4030369>
- Kimura, K.; Kikuchi, S. & Yamasaki, S. (1999) – Accurate root length measurement by image analysis. *Plant and Soil*, vol. 216, n. 1-2, p. 117-127. <https://doi.org/10.1023/A:1004778925316>
- Kiyono, Y.; Monda, Y.; Toriyama, J.; Chaddy, A.; Goh, K.J. & Melling, L. (2015) – Destructive sampling method for estimating the biomasses of African oil palm (*Elaeis guineensis*) plantations on tropical peatland. *Bulletin of Forestry and Forest Products Research Institute*, vol. 14, n. 3, p. 147-158. [https://doi.org/10.20756/fpri.14.3\\_147](https://doi.org/10.20756/fpri.14.3_147)
- Marsh, B.a'B. (1971) – Measurement of length in random arrangements of lines. *Journal of Applied Ecology*, vol. 8, n. 1, p. 265-267.
- Newman, E.I. (1966) – A method of estimating the total length of root in a sample. *Journal of Applied Ecology*, vol. 3, n. 1, p. 139-145.
- Nye, P.H. & Tinker, P.H. (1977) – *Solute Movement in the Soil-Root System*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Rees, A.R. & Tinker, P.B. (1963) – Dry-matter production and nutrient content of plantation oil palms in Nigeria. I. Growth and dry-matter production. *Plant*

*and Soil*, vol. 19, n. 1, p. 19–32. <https://doi.org/10.1007/BF01347859>

Sanquetta, C.R.; Netto, S.P.; Corte, A.P.D.; Rodrigues, A.L.; Behling, A. & Sanquetta, M.N.I. (2015) – Quantifying biomass and carbon stocks in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Northeastern Brazil. *African Journal of Agricultural Research*, vol. 10, n. 43, p. 4067-4075. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.9582>

Schroth, G. (1999) – A review of belowground interactions in agroforestry, focusing on mechanisms and management options. *Agroforestry Systems*, vol. 43, p. 5-34. <https://doi.org/10.1023/A:1026443018920>

Taiz, L.; Zeiger, E.; Møller, I.M. & Murphy, A. (2017) – *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6.ed. Porto Alegre: Artmed. 888 p.

Tanaka, S.; Yamauchi, A. & Kono, Y. (1995) – Easily accessible method for root length measurement using an image analysis system. *Japan Journal Crop Science*, vol. 64, n. 1, p. 144-147. <https://doi.org/10.1626/jcs.64.144>

Tennant, D. (1975) – A test of a modified line intersect method of estimating root length. *Journal of Ecology*, vol. 63, n. 3, p. 995-1001. <https://doi.org/10.2307/2258617>

USDA (2018) – *Oilseeds: World Market and Trade*. United States Department of Agriculture. [cit. 2018.06.25] <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/compositeViz>

Vamerali, T.; Ganis, A.; Bona, S. & Mosca, G. (2003) – Analysis of root images from auger sampling with a fast procedure: a case of application to sugar beet. *Plant and Soil*, vol. 255, p. 387-397. <https://doi.org/10.1023/A:1026147607879>

Yahya, Z.; Husin, A.; Talib, J.; Othman, J.; Ahmed, O.H. & Jalloh, M.B. (2010) – Oil palm (*Elaeis guineensis*) roots response to mechanization in Bernam series soil. *American Journal of Applied Sciences*, vol. 7, n. 3, p. 343-348. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2010.343.348>

# Root morphological traits of oil palm genotypes with differential resistance to fatal yellowing

## Características morfológicas radiculares de genótipos de palma de óleo com resistência diferencial ao Amarelecimento Fatal

Gerson Carlos Pinto Gloria<sup>1\*</sup>; Steel Silva Vasconcelos<sup>2</sup>; Rui Alberto Gomes Junior<sup>2</sup>; Alessandra de Jesus Boari<sup>2</sup>; Marcelo Murad Magalhães<sup>2</sup>

### Highlights

We compared roots of oil palm genotypes with different tolerance to FY.  
The biomass of fine and very fine root is higher in the hybrid than in its parents.  
Fine and very fine root length is greater in the hybrid than in its parents.  
The superiority of the hybrid's root system is due to overdominance.

### Abstract

Brazil has an extensive area where the climate and soil are suitable for oil palm growing. However, in part of this area, production has been limited by the occurrence of the fatal yellowing (FY) anomaly, whose initial symptom is the rotting of absorptive roots. This symptom can be more severe in oil palm genetic materials with a smaller root system. The aim of this study was to examine morphological traits of roots and shoots of seedlings of three oil palm genotypes with different degrees of resistance to FY, namely, Tenera (sensitive), Caiuá (resistant) and Interspecific Hybrid (resistant) to provide bases to elucidate the differential resistance of these materials to FY. Shoot biomass did not vary statistically between the genetic materials. The mass, length and area of fine and very fine roots were significantly higher in the Interspecific Hybrid than in Caiuá and Tenera. The fine and very fine roots of Interspecific Hybrid had a larger mass than Caiuá (114 and 133%, respectively) and Tenera (216 and 178%, respectively). The Interspecific Hybrid also exhibited higher values for the length of fine and very fine roots than Caiuá (155 and 99% respectively) and Tenera (228 and 94% respectively). The root traits of the Interspecific Hybrid and Tenera are compatible with their differential resistance to FY. Our results demonstrate the importance of expanding the study of the relationship between root morphology and resistance to FY in these genetic materials under conditions that favor the occurrence of the anomaly, such as flooding.

**Key words:** Leaf area. Fatal Yellowing. Heterosis. Oil palm. Specific root length.

<sup>1</sup> Graduate Student, Universidade Federal Rural da Amazônia, Institute of Agrarian Sciences, Belém, PA, Brazil. E-mail: gersoncarlos@hotmail.com

<sup>2</sup> Researcher, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA Amazônia Oriental, Belém, PA, Brazil. E-mail: steel.vasconcelos@embrapa.br; rui.gomes@embrapa.br; alessandra.boari@embrapa.br; marcelo.magalhaes@embrapa.br

\* Author for correspondence

## Resumo

O Brasil possui uma extensa área com clima e solo aptos ao plantio de palma de óleo. No entanto, a produção em parte desta área tem sido limitada pela ocorrência da anomalia Amarelecimento Fatal (AF), cujo sintoma inicial é o apodrecimento das raízes de absorção. Esse sintoma pode ser mais severo em materiais genéticos de palma de óleo que apresentem sistema radicular reduzido. O objetivo foi avaliar características morfológicas de raízes e parte aérea de mudas de três genótipos de palma de óleo com graus diferentes de resistência ao AF: Tenera (sensível), Caiaué (resistente) e Híbrido Interespecífico (resistente) para fornecer subsídios ao entendimento da resistência diferencial desses materiais ao AF. A biomassa da parte aérea não variou estatisticamente entre os materiais genéticos. Massa, comprimento e área de raízes finas e muito finas foram significativamente maiores no Híbrido Interespecífico do que no Caiaué e no Tenera. O Híbrido Interespecífico apresentou valores de massa de raízes finas e muito finas superiores em relação ao Caiaué (114 e 133%, respectivamente) e Tenera (216 e 178%, respectivamente). O Híbrido Interespecífico também apresentou valores superiores de comprimento de raízes finas e muito finas em relação ao Caiaué (155 e 99% respectivamente) e Tenera (228 e 94% respectivamente). As características radiculares do Híbrido Interespecífico e do Tenera são compatíveis com sua resistência diferencial ao AF. Nossos resultados demonstram a importância de ampliar o estudo da relação entre morfologia radicular e resistência ao AF destes materiais genéticos em condições que favoreçam a ocorrência da anomalia, como alagamento.

**Palavras-chave:** Amarelecimento Fatal. Área foliar. Comprimento específico de raiz. Dendê. Heterose.

## Introduction

Palm oil is widely used worldwide, mainly for food (71%) and in the production of cosmetics (24%) and energy (5%) (United States Department of Agriculture [USDA], 2019). Brazil is the 9th largest producer of palm fruit (Food and Agriculture Organization [FAO], 2021) and oil (USDA, 2021) in the world. The annual Brazilian production of around 360,000 t of palm oil and 30,000 t of palm kernel oil is insufficient to meet the domestic demand of 506,071 t of palm oil and 233,000 t of palm kernel oil (Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento [MAPA], 2018). Therefore, there is a great need to expand oil palm cultivation to minimize the heavy dependence on imports.

The Amazon has soil and climate conditions favorable to the cultivation of oil palm and concentrates 91% of the total area planted with this crop in Brazil. However, in some places of the Brazilian Amazon, the expansion of the crop has been limited by the occurrence of an anomaly known as fatal yellowing (FY). As the name suggests, FY causes yellowing of the basal leaflets of intermediate leaves and, over time, it can result in the plant's total drying out and, ultimately, its death (Duff, 1963; Turner & Planters, 1981; Trindade, Poltronieri, & Furlan, 2005).

In the soil, FY causes root rot, which is indeed the primary symptom of FY (Van Slobbe,

1991), as it appears before foliar symptoms. Fatal yellowing reduces the growth of tertiary and quaternary roots (Albertazzi, Bulgarelli, & Chinchilla, 2005). Accordingly, plants affected by FY have a reduced root system when compared with plants without FY symptoms (Ayala, 2001).

The etiology of FY is still unknown, but its occurrence is related to certain environmental conditions. There is a direct relationship between high rainfall and the development of a favorable environment (e.g., less soil aeration) for the appearance of FY (Turner & Planters, 1981; Monge, Chinchilla, & Wang, 1993; Alvarado, Chinchilla, Bulgarelli, & Sterling, 1997; Chinchilla & Durán, 1998, 1999; De Franqueville, 2001; Venturieri, Fernandes, Boari, & Vasconcelos, 2009). Floods or water table elevation affect the development of the root system in oil palm, significantly reducing its root density (Albertazzi, Chinchilla, & Ramírez, 2009). In some cases, however, these negative effects on the roots do not manifest in the shoot (Da Ponte et al., 2019; Kastelein, Van Slobbe, & De Leeuw, 1990).

According to the principle of functional balance (Le Chatelier, 2010), a stable system under stress undergoes morphological changes in an attempt to minimize stress. These changes are responses of biomass allocation to different

plant organs, and may be governed by genetic factors (Poorter & Nagel, 2000). Biomass changes are usually accompanied by alterations in other secondary variables (architecture, density, volume), which are directly or indirectly affected by stress (Szaniawski, 1983). Therefore, resistance to FY may be related to a greater or lesser ability of the plant to minimize the negative effects of water balance through uptake organs, mainly by stimulation of root system development and translocation of assimilates (Da Ponte et al., 2019).

The Interspecific Hybrid (ISH) of oil palm (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*), a genetic material resistant to FY, has been planted in areas vulnerable to the occurrence of this anomaly (Homma, 2016). There is a morphological difference in the shoots between ISH and the African oil palm (*E. guineensis*) (Corley & Tinker, 2016). The root system of these genetic materials is possibly also different. Therefore, our objective was to evaluate morphological traits of the root system and shoots of these genotypes to provide bases to elucidate the differential resistance of these materials to FY.

## Material and Methods

We developed this study in 2017 at the Laboratory of Sustainable Systems Analysis (LASS) at Embrapa Eastern Amazon, in BelémPA, Brazil (48°26'45" W and 1°26'31" S). We evaluated eight-month-old seedlings of ISH, Tenera (*E. guineensis* × *E. guineensis*) and Caiuá (*E. oleifera*) grown in a greenhouse. We planted pre-germinated seeds originating from the germplasm bank of Embrapa Western Amazon (10/24/2016) in black polyethylene bags (15 × 28 cm) filled with soil substrate and chicken manure. The seedlings grew under the same light and management conditions in the greenhouse.

### Shoot biomass

To measure the shoot biomass, we identified the leaves of each seedling, starting with the spear leaf (leaf 1, in this study), and numbered the remaining leaves following the

spiral arrangement until the last green leaf. We detached all the leaves by making a basal cut on the petiole, leaving only the bulb at the end, which we cut close to the insertion of the roots.

Next, we separated the petiole from the leaf blade. We captured images (300 dpi) of each leaf blade with an Epson desktop scanner, model J371A, and converted them into binary images using ImageJ® V.1.46 software, National Institute of Health, USA. We used a millimeter scale on each generated image for software calibration (Figure 1). We performed this procedure on 10 different images with the same DPI value and used the average (118.20 pixels/cm) as the default resolution throughout the assessment of leaf area. Then, we dried the leaf blade, petiole and bulb in a forced-air oven (65 °C, 72 h) and weighed them on a precision scale with three decimal places. Finally, we added the total leaf dry mass (blade + petiole) and bulb dry mass to determine the total shoot biomass.

### Root biomass

To evaluate root biomass, we washed the root system of each plant (Figure 2) with running water over a set of sieves in a decreasing mesh sequence (2 and 0.30 mm). Then, we separated the roots according to the following diameter classes: coarse (>1 mm), fine (0.50-0.99 mm) and very fine (0.250.49 mm). From each sample, we scanned a subsample of approximately 10, 1.0 and 0.5 g of each root class (coarse, fine and very fine, respectively). Subsequently, we dried the sample and subsamples of all roots in a forced-air oven (65 °C, 72 h). Afterwards, we calculated the total root system biomass as the sum of the biomass of the root classes (dry mass of samples + respective root subsamples of each diameter class) of each plant (Gloria, 2016).

To determine root length, we used the SmartRoot plugin of ImageJ® software (Costa, Cunha, Jorge, & Araújo, 2014; Delory et al., 2017). Preliminary tests revealed that the resolution was 35,367, 39,300 and 39,335 pixels/cm for the coarse, fine, and very fine roots, respectively.



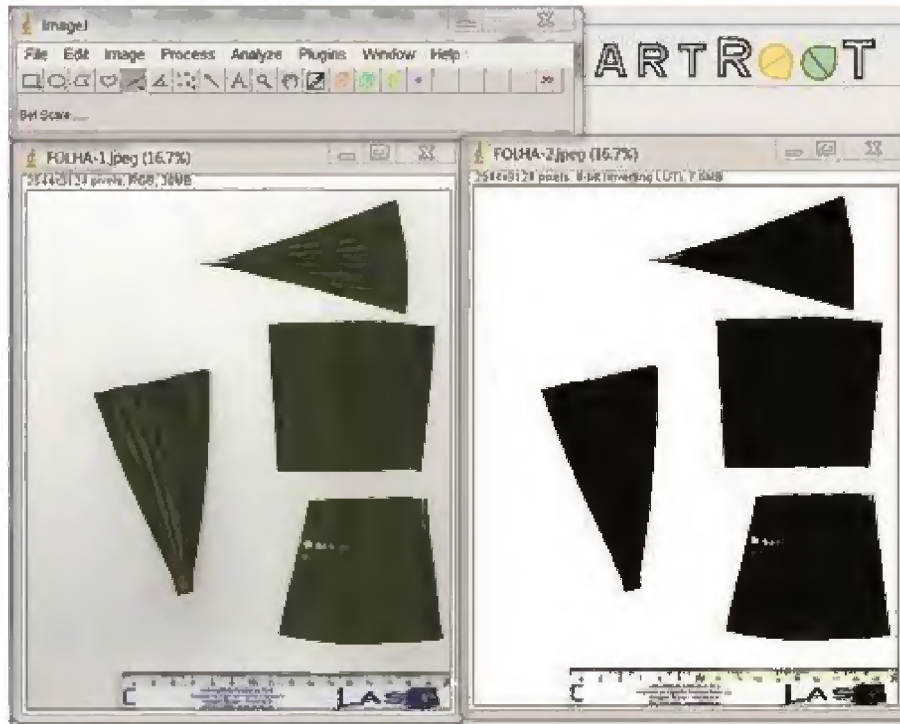


Figure 1. Scanned images of pieces of leaf blades from oil palm seedlings.

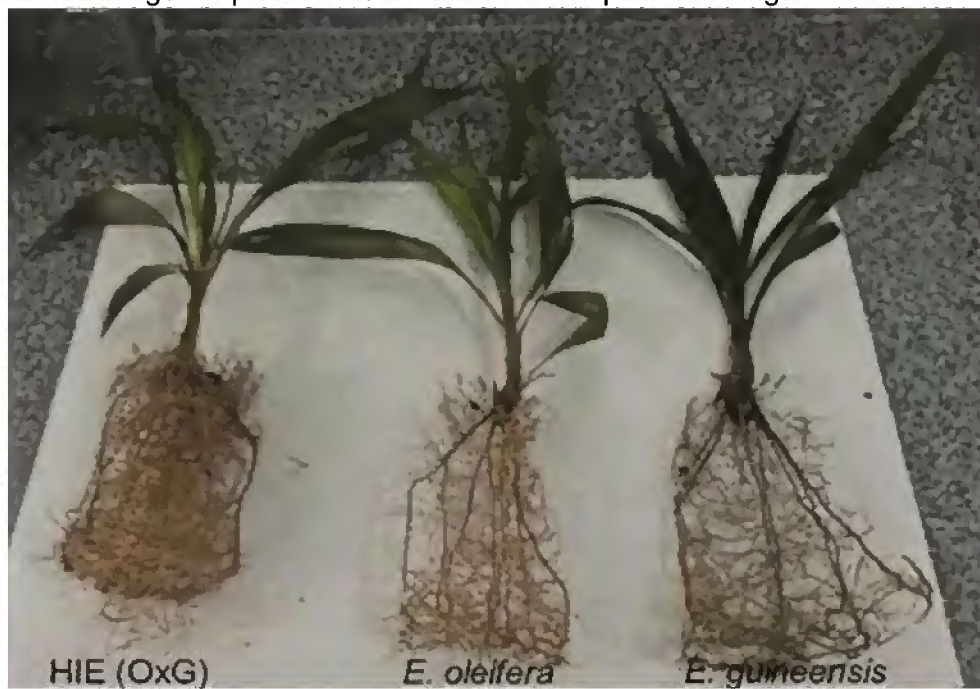


Figure 2. Root system of Interspecific Hybrid (HIE), Caiuá (*Elaeis oleifera*) and Tenera (*Elaeis guineensis*) seedlings.

**Table 1**  
**Coefficient of variation of dependent variables**

Variable	Coefficient of variation (%)			
	Total	Coarse	Fine	Very fine
Shoot biomass	15.83	-	-	-
Leaf area	14.13	-	-	-
Root biomass	49.59	34.16	73.52	91.75
Root length	-	71.68	82.95	67.45
Root area	-	71.68	82.95	67.45
Specific root length	-	39.51	25.04	34.20
Root mass/Leaf mass ratio	45.98	-	-	-
Root area/Leaf area ratio	59.56	-	-	-

Still in the phase of methodology adjustments, we chose to use the Trace Root tool instead of the Automatic Drawing mode, as the former was more precise and specific. In addition, fine and very fine root fragments were not detected in Automatic Drawing mode. To estimate the total length, we applied the following equation:  $\frac{L_{ss} \times M_t}{M_{ss}}$ , where  $L_t$  is the total length;  $L_{ss}$ , the subsample length;  $M_t$ , the total dry mass (sample + subsample); and  $M_{ss}$ , the subsample dry mass. We estimated root area with the following equation:  $A=2 \times \pi \times r \times L$ , where  $r$  is the radius of the roots (in cm) and  $L$  is the length of the subsample (in cm). To estimate the root area, we considered  $r$  as the intermediate value of the variation range of each diameter class, that is, 0.125 cm for coarse roots, 0.075 cm for fine roots and 0.037 cm for very fine roots.

We calculated specific root length as the ratio between total length and total dry mass. We calculated the root/shoot ratio for both biomass and area using the following equations:  $\frac{\text{root biomass}}{\text{Shoot biomass}}$  and Area ratio  $\frac{\text{Root area}}{\text{Leaf area}}$ , respectively.

The experiment was laid out in a completely randomized design with 20 replicates (n=20) and one plant per plot. We applied a one

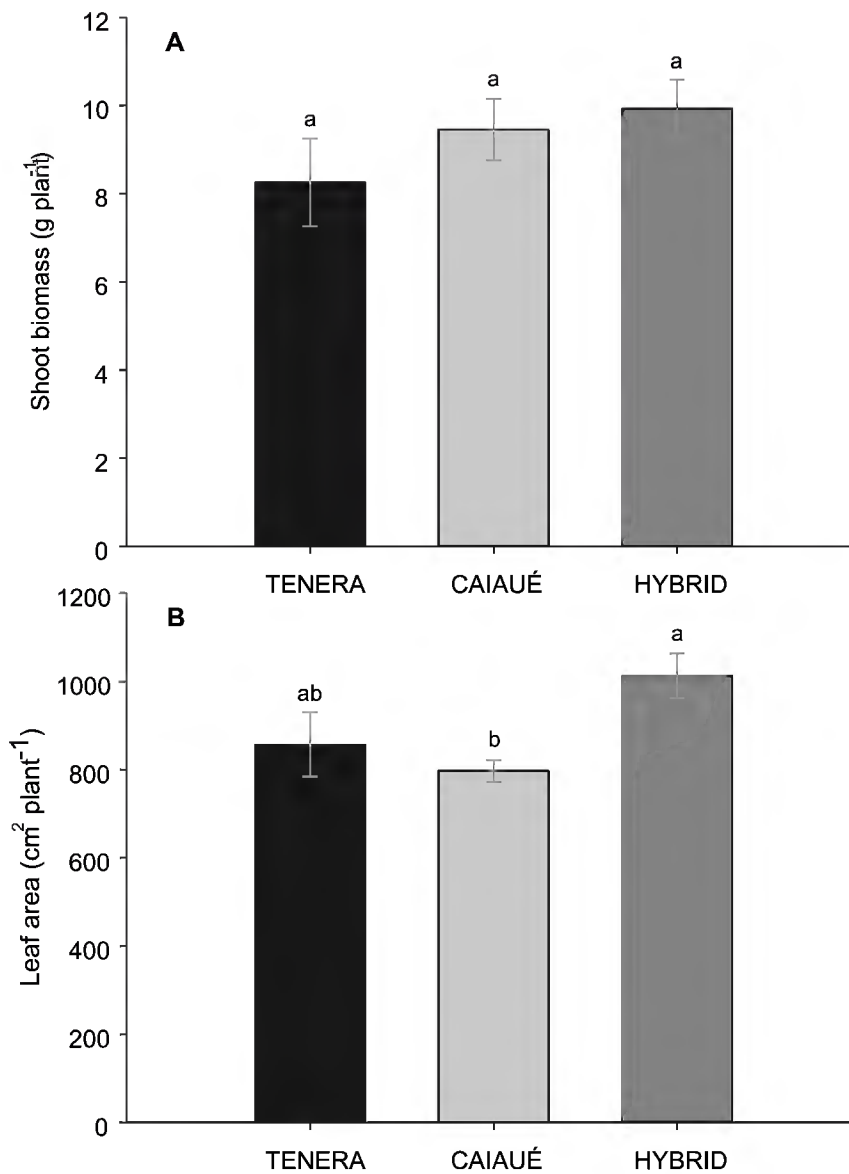
ANOVA to test the effect of genetic material on shoot and root variables using SigmaPlot software version 14.0. We performed Tukey's test at 5% for mean comparison. Table 1 shows the coefficient of variation of the analyzed variables.

## Results and Discussion

Shoot biomass did not differ between the evaluated materials (ISH:  $9.92 \pm 0.66$  g plant<sup>-1</sup>, Caiaué:  $9.45 \pm 0.69$  g plant<sup>-1</sup> and Tenera:  $8.25 \pm 0.99$  g plant<sup>-1</sup>) (Figure 3A). The leaf area of ISH ( $10.12 \pm 0.51$  m<sup>2</sup> plant<sup>-1</sup>) was significantly larger than that of Caiaué ( $7.97 \pm 0.25$  m<sup>2</sup> plant<sup>-1</sup>), where as the leaf area of Tenera ( $8.57 \pm 0.73$  m<sup>2</sup> plant<sup>-1</sup>) did not differ significantly from those of other genetic materials (Figure 3B). In the literature, differences are described both for shoot biomass accumulation and leaf area between ISH and Tenera. In Colombia, the shoot biomass and leaf area of 11-monthold seedlings of ISH were higher than those of Tenera (Ibarra-Ruales & Reyes-Cuesta, 2015). Similarly, the leaf area of ISH was larger than that of its parents (*E. oleifera* and *E. guineensis*), in studies with adult plants (Hardon, Williams, & Watson, 1969; Hartley, 1988).

The total root dry mass of ISH was higher

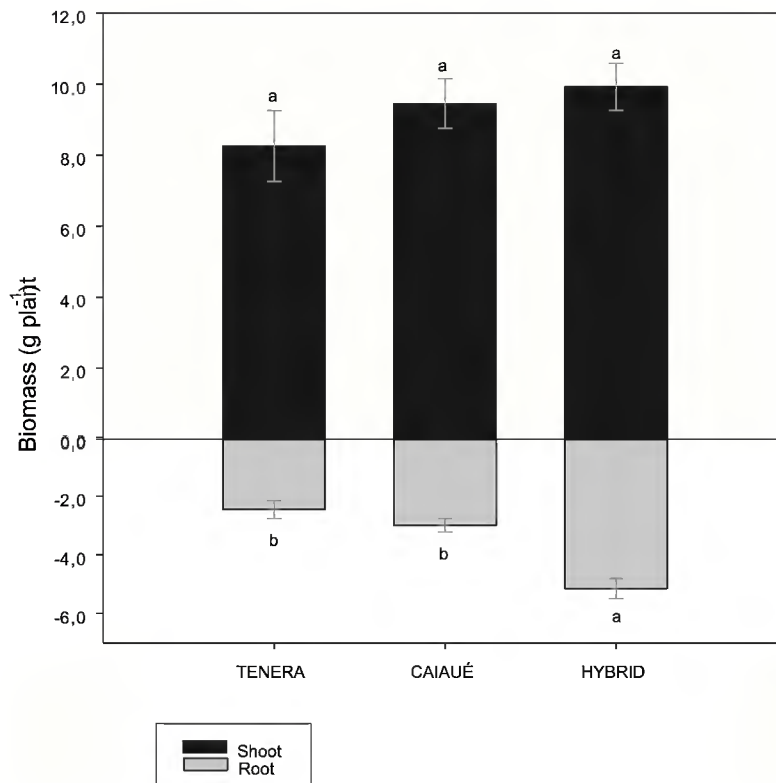
than that of the other materials (71.7% higher compared with Caiaué; and 109.8% higher compared with Tenera) (Figure 4). These results suggest that ISH allocates more biomass to the root system, since the genetic materials did not differ statistically for shoot mass. The Interspecific Hybrid also had higher mass values of the main absorptive roots the fine (Figure 5B) and very fine (Figure 5C) roots as compared with the other genetic materials, agreeing with a possible genetic factor (overdominance). The difference in root area and length between ISH and the other genetic materials is also consistent with the overdominance hypothesis. The overdominance hypothesis proposed by Shull (1908) postulates that the cause of heterosis are the heterozygous genes, which are always superior to homozygous genes for the same locus. Thus, F1 individuals, such as the Hybrid, may express overdominance relative to their parents, as observed for other crops (Souza, Magalhães, Castro, Duarte, & Lavinsky, 2016).



**Figure 3.** Shoot biomass (A) and leaf area (B) of eight-month-old seedlings of oil palm genotypes Tenera, Caiaué and Interspecific Hybrid. Data are expressed as mean  $\pm$  standard error (n=20). Different letters indicate a significant difference between means by Tukey's test ( $p < 0.05$ ).

The overdominance hypothesis may explain the results of the root system of the Hybrid, which showed a larger dry mass of fine (Figure 5B) and very fine (Figure 5C) roots than the other genetic materials. This finding suggests that the Interspecific Hybrid has a

greater nutrient scavenging and absorption potential than Tenera and Caiaué. On the other hand, there was no difference in the biomass of coarse roots (Figure 5A), which are more closely related to maintenance structures (support, reserves) (Corley & Tinker, 2016).

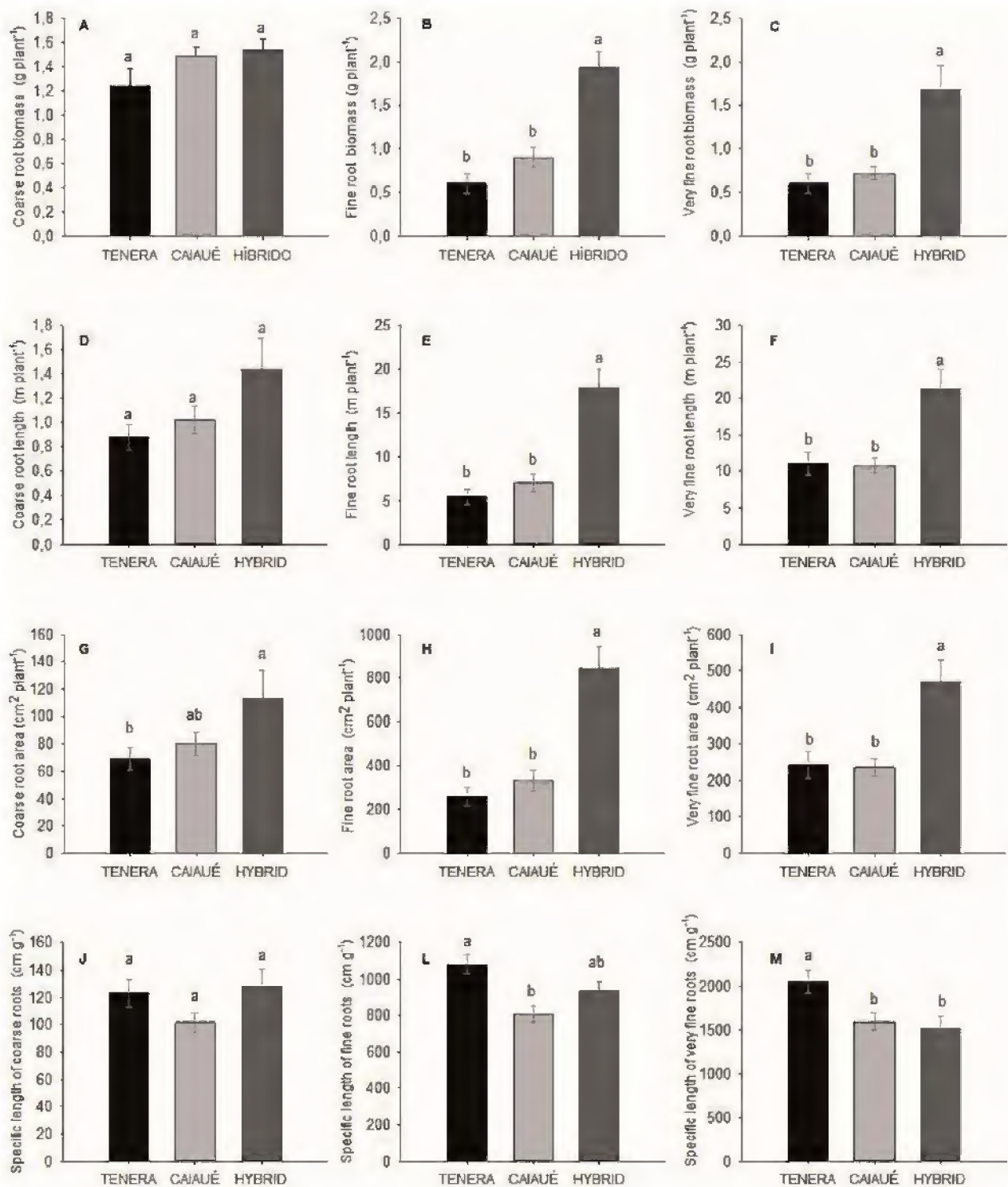


**Figure 4.** Shoot biomass and root biomass of eight-month-old seedlings of oil palm genotypes Tenera, Caiaué and Interspecific Hybrid. Data are expressed as mean  $\pm$  standard error (n=20). Different letters indicate a significant difference between means by Tukey's test ( $p < 0.05$ ).

The greater length of absorptive roots in the Interspecific Hybrid (Figures 5 E-F) in our study is not expressed solely under favorable growth conditions (without nutrient, water and light restrictions). In another study, a prolonged water deficit (57 days) caused a 12% increase in total root length and a 41.7% reduction in the root biomass of seedlings of hybrids (BRS Manicoré and BRS C 2501) at one year of age (Silva et al., 2017). Thus, the study of Silva et al. (2017) shows that the Interspecific Hybrid allocates energy to increase the absorption potential in situations of reduced water availability.

(fine roots) structures (Eissenstat & Yanai, 1997). In this study, Tenera showed the highest specific root length value. The high specific root length values of the fine (Figure 5L) and very fine (Figure 5M) root classes of Tenera suggest that this genetic material allocates many of its photosynthates to increase branching rather than diameter. Such increased root branching strategy is a trait that exists not only in palm, but also in other plant species with high specific root length values (Bilbrough & Caldwell, 1995; Bouma, Nielsen, Van Hal, & Koutstaal, 2001; Pregitzer, Kubiske, Yu, & Hendrick, 1997).

Specific root length allows evaluating how a plant invests its photoassimilates between supporting (coarse roots) and resource capture

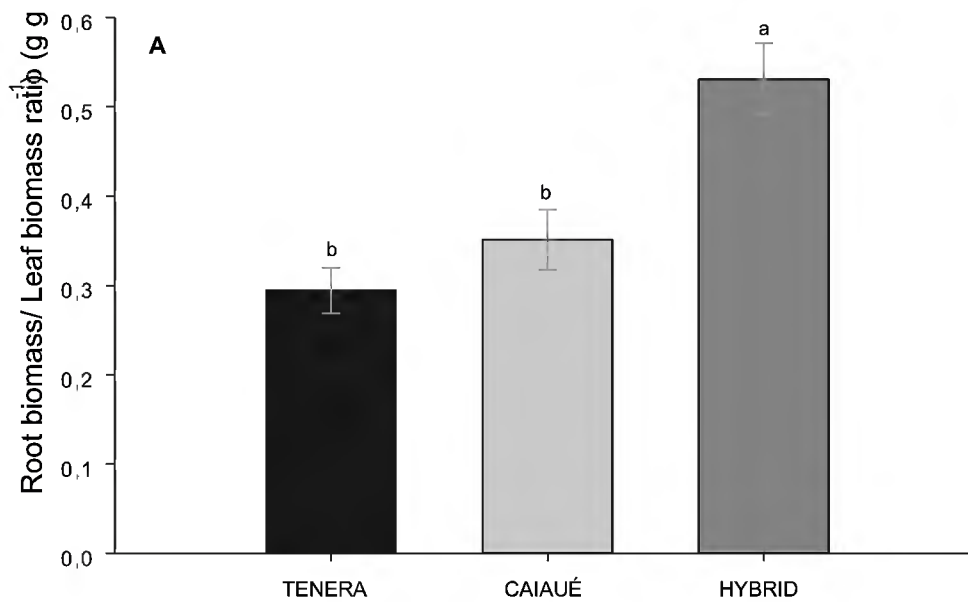


**Figure 5.** Root system variables of eight-month-old seedlings of oil palm genotypes Tenera, Caiaué and Interspecific Hybrid. Data are expressed as mean  $\pm$  standard error (n=20). Different letters indicate a significant difference between genetic materials by Tukey's test ( $p < 0.05$ ).

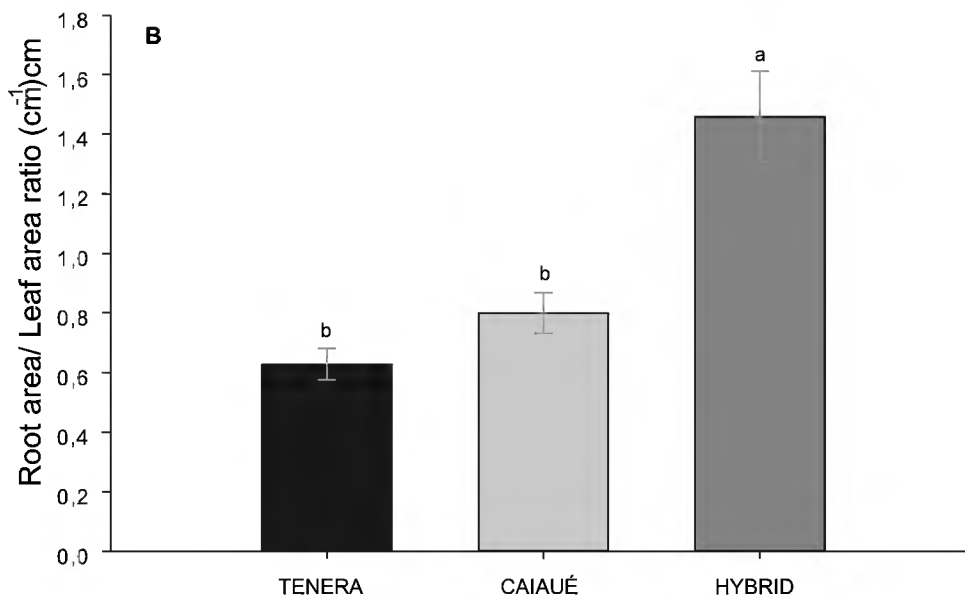
Although Tenera exhibited the greatest specific root length, its dry mass and root length were lower than those of ISH and equal to those of Caiaué, which suggests that Tenera roots have a smaller diameter or less tissue density than those of the other two genetic materials. Roots with low tissue density have shorter longevity, a trait that may be unfavorable to Tenera, since FY early effects occur in the root system (Van Slobbe, 1991; Bernardes, 2001), affecting the meristematic region of the roots (Kastelein et al., 1990).

In oil palm, there is a positive relationship between the root system and resistance to FY. However, it is not possible to state that root biomass alone is responsible for the resistance of Caiaué and HIE to FY, since Caiaué showed similar root length and dry mass values to those of Tenera, a material susceptible to FY, in our study. Thus, it is possible that the greater resistance of Caiaué over Tenera is associated

with a greater amount of tanniferous cells present in the roots of Caiaué (Barcelos, 1986). In addition, Tenera is more susceptible to environmental stress in its shoots, as compared with Caiaué and HIE (Chia, 2012). The proportion in which plants invest their photoassimilates for root system development whether this is influenced by endogenous or exogenous factors can be measured by the root/leaf mass and root/leaf area ratios. The higher the ratio, the greater the energy input for root development relative to shoot development (Marschner, 1986; Rodríguez & Leihner, 2006). Therefore, both the root biomass and root/shoot mass ratio results (Figure 6A) indicate that ISH allocates more energy for the development of its root system as compared with the other genetic materials. This pattern can also be seen in the root/leaf area ratio (Figure 6B), which suggests that ISH has a greater below-ground resource capturing potential than the other genetic materials.



continue...  
 contuation  
 ...



**Figure 6.** Ratios between root mass and shoot mass (A) and between root area and leaf area (B) of seedlings of oil palm genotypes Tenera, Caiaué and Interspecific Hybrid. Data are expressed as mean  $\pm$  standard error (n=20). Different letters indicate a significant difference between genetic materials by Tukey's test ( $p < 0.05$ ).

The morphological differences exhibited by ISH relative to the other genetic materials can be advantageous under other limiting conditions, such as deficient soil nutrients. Its greater biomass allocation to the root system, as compared with that of its parents, allows better exploration of water and nutrients in the soil, which is potentially useful in regions with environmental limitations.

In fact, in environments with some type of resource limitation, the growth of Tenera can be strongly affected. In Côte d'Ivoire (Dufrêne, 1989; Dufrêne, Ochs, & Saugier, 1990; Dufrêne, Bernard, Rey, Quencez, & Saugier, 1992), water deficit resulted in high root biomass and restricted shoot growth in oil palm (Tenera), leading to a root/shoot ratio higher than  $0.9 \text{ g g}^{-1}$ , which is considerably higher than the value observed in our study ( $0.3 \text{ g g}^{-1}$ ). On the other hand, excess water (flooding) can compromise root development, but not the shoot biomass of Tenera (Da Ponte et al., 2019), causing high

root/shoot mass values ( $0.25 \text{ g g}^{-1}$ ), similar to the results found in our study ( $0.3 \text{ g g}^{-1}$ ) and reported by Henson and Chai (1997) in three-year-old plants. Thus, the sensitivity of Tenera to abiotic factors, coupled with the low allocation of biomass to the root system, may contribute to the susceptibility of this material to FY, which is not true for ISH.

## Conclusions

The mass, length and area of fine and very fine roots were significantly higher in the Interspecific Hybrid (ISH), a material resistant to FY, as compared with Tenera, a susceptible material. However, our study does not allow inferring whether there is a causal relationship between the root system and resistance to FY, thus warranting further experimentation to investigate ISH in environments with FY. The intermediate values of root mass and length of the other resistant material (Caiaué) suggest that the morphology of the root system (biomass and length) alone may not be the factor



responsible for resistance to FY.

### Authors' contributions

Rui Gomes Junior and Alessandra de Jesus Boari cultivated the seedlings in the greenhouse. Gerson Carlos Pinto Gloria and Steel Silva Vasconcelos designed and conducted laboratory experiments. Gerson Carlos Pinto Gloria, Steel Silva Vasconcelos, Rui Gomes Junior, Alessandra de Jesus Boari and Marcelo Magalhães Murad composed the article.

### Acknowledgments

The authors thank the Amazon Foundation for the Support of Studies and Research (FAPESPA) for the doctoral grant; and the team at the Laboratory of Sustainable Systems Analysis at Embrapa Eastern Amazon for their logistical and technical support.

### References

- Albertazzi, H., Bulgarelli, J., & Chinchilla, C. (2005). Onset of spear rot symptoms in oil palm and prior (and contemporary) events. *ASD Oil Palm Papers*, 28, 21-33.
- Albertazzi, H., Chinchilla, C., & Ramírez, F. (2009). Soil characteristics and root development in young oil palms (*Elaeis guineensis* Jacq.) planted in sites affected by bud rots (pudrición del cogollo). *ASD Oil Palm Papers*, 33, 1-14.
- Alvarado, A., Chinchilla, C. M., Bulgarelli, J., & Sterling, F. (1997). Factores agronómicos asociados a la "pudrición común de la flecha / arqueo foliar" en palma aceitera. *ASD Oil Palm Papers*, 15, 8-28.
- Ayala, L. S. (2001). Pesquisa sobre amarelecimento fatal do dendezeiro. Belém: DENPASA.
- Barcelos, E. (1986). *Características genético e ecológicas de populações naturais de caiaué (Elaeis oleifera (H.B.K) Cortés) na Amazônia Brasileira*. Dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, AM, Brasil.
- Bernardes, M. S. R. (2001). *Relatório de visitas à plantação de Paricatuba, na Denpasa, visando à identificação das causas do AF*. Belém: DENPASA.
- Bilbrough, C. J., & Caldwell, M. M. (1995). The effects of shading and N status on root proliferation in nutrient patches by the perennial grass *Agropyron desertorum* in the field. *Oecologia*, 103(1), 10-16. doi: 10.1007/BF00328419
- Bouma, T. J., Nielsen, K. L., Van Hal, J., & Koutstaal, B. (2001). Root system topology and diameter distribution of species from habitats differing in inundation frequency. *Functional Ecology*, 15(3), 360-369. doi: 10.1046/j.1365-2435.2001.00523.x
- Chia, G. S. (2012). *Caracterização morfofisiológica e anatômica de folhas de dendezeiro (Elaeis guineensis Jacq.), de caiaué (E. oleifera (Kunth) Cortés) e híbrido interespecífico (E. guineensis x E. oleifera) nas condições da Amazônia*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, Brasil. Recuperado de <https://tede.ufam.edu.br/>
- Chinchilla, C. M., & Durán, N. (1998). Manejo de problemas fitosanitarios en palma de aceite. Una perspectiva agronómica. *Revista Palmas*, 19, 242-256.
- Chinchilla, C. M., & Durán, N. (1999). Nature and management of spear rot-like problems in oil palm: a case study in Costa Rica. *Annals of International Palm Oil Congress*, Kuala Lumpur, MY, Malaysia.
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2016). *The oil palm* (5nd ed). Oxford, UK: Wiley Blackwell.
- Costa, M. C. G., Cunha, I. M. L., Jorge, L. A. C., & Araújo, I. C. S. (2014). Public-domain software for root im-age analysis. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(5), 1359-1366. doi: 10.1590/S0100-06832014000500001
- Da Ponte, N. H. T., Nunes Santos, R. I., Lima

- Lopes, W. R., Fº., Lisboa Cunha, R., Murad Magalhães, M., & Alves Pinheiro, H. (2019). Morphological assessments evidence that higher number of pneumatophores improves tolerance to long-term waterlogging in oil palm (*Elaeis guineensis*) seedlings. *Flora*, 250, 52-58. doi: 10.1016/j.flora.2018.11.017
- De Franqueville, H. (2001). *La pudrición del cogollo de la palma aceitera en América Latina*. Montpellier: Cirad, Departamento de Cultivos Perennes.
- Delory, B. M., Weidlich, E. W. A., Meder, L., Lütje, A., Duijnen, R. V., Weidlich, R., & Temperton, V. M. (2017). Accuracy and bias of methods used for root length measurements in functional root research. *Methods in Ecology and Evolution*, 8(11), 1594-1606. doi: 10.1111/2041-210X.12771
- Duff, A. (1963). The bud rot little leaf disease of the oil palm. *Journal of West African Institute for Oil Palm Research*, 4(14), 176-190.
- Dufrêne, E. (1989). *Photosynthese, consommation en eau et modélisation de la production chez le palmier à huile (Elaeis guineensis Jacq.)*. Thèse de Doctorat. Université de Paris-Sud, Orsay.
- Dufrêne, E., Dubos, B., Rey, H., Quencez, P., & Saugier, B. (1992). Changes in evapotranspiration from an oil palm stand (*Elaeis guineensis* Jacq.) exposed to seasonal soil water deficits. *Acta Oecologica*, 13(3), 299-314.
- Dufrene, E., Ochs, R., & Saugier, B. (1990). Oil palm photosynthesis and productivity linked to climatic factors. *Oleagineux*, 45(8-9), 345-355.
- Eissenstat, D. M., & Yanai, R. D. (1997). The ecology of root lifespan. *In Advances in Ecological Research*, 27, 1-60. doi: 10.1016/S0065-2504(08)60005-7
- Food and Agriculture Organization (2021). *Top 20 countries - production of oil palm fruit in 2019*. Retrieved from [http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries\\_by\\_commodity](http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity)
- Gloria, G. C. P. (2016). *Biomassa de raízes em plantio de híbrido interespecífico de Palma de óleo no leste da Amazônia*. Tese de mestrado, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, Brasil.
- Hardon, J., Williams, C., & Watson, I. (1969). Leaf area and yield in the oil palm in Malaya. *Experimental Agriculture*, 5(1), 25-32. doi: 10.1017/S0014479700009935
- Hartley, C. W. S. (1988). *The oil palm* (3rd ed). London: Longman.
- Henson, I. E., & Chai, S. H. (1997). Analysis of oil palm productivity. II. Biomass, distribution, productivity and turnover of the root system. *Journal of Oil Palm Research*, 9(2), 78-92.
- Homma, A. K. O. (2016). *Histórico do desenvolvimento de híbridos interespecíficos entre caiaué e dendezeiro*. Belém: EMBRAPA Amazônia Oriental.
- Ibarra-Ruales, L. N., & Reyes-Cuesta, R. (2015). Crecimiento en vivero de las palmas aceiteras *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis* y *Elaeis guineensis* x *Elaeis guineensis* en Tumaco Colombia. *Corpoica Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 16(2), 239-250. doi: 10.21930/rcta.vol16\_num2\_art:370
- Kastelein, P., Van Slobbe, W. G., & De Leeuw, G. T. N. (1990). Symptomatological and histopathological observations on oil palms from Brazil and Ecuador affected by fatal yellowing. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 96, 113-117. doi: 10.1007/BF02005135
- Le Chatelier, H. (2010). *Recherches experimentales et theoretiques sur les equilibres chimiques*. Paris: Dunod, Kessinger Publishing.
- Marschner, H. (1986). *Mineral nutrition of higher plants*. London: Academic Press.
- Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (2018). *Diagnóstico da produção sustentável da palma de óleo*.

- Recuperado de [https://aprobio.com.br/novosite/wp-content/uploads/2018/08/Diagn%C3%B3stico-Prod-Sust-daPalma-de-%C3%93leo\\_MAPA\\_2018.pdf](https://aprobio.com.br/novosite/wp-content/uploads/2018/08/Diagn%C3%B3stico-Prod-Sust-daPalma-de-%C3%93leo_MAPA_2018.pdf).
- Monge, J. E., Chinchilla, C. M., & Wang, A. (1993). Studies on the etiology of the crown disease / spear rot syndrome in oil palm. *ASD Oil Palm Papers*, 33, 1-16.
- Poorter, H., & Nagel, O. (2000). The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO<sub>2</sub>, nutrients and water: a quantitative review. *Australian Journal of Plant Physiology*, 27(6), 1191. doi: 10.1071/PP97167
- Pregitzer, K. S., Kubiske, M. E., Yu, C. K., & Hendrick, R. L. (1997). Relationships among root branch order, carbon, and nitrogen in four temperate species. *Oecologia*, 111(3), 302-308. doi: 10.1007/s004420050239
- Rodríguez, W., & Leihner, D. (2006). *Análisis de crecimiento vegetal. Fisiología de la producción de cultivos tropicales*. San José: Editorial Universidad de Costa Rica.
- Shull, G. H. (1908). The composition of a field of maize. *Journal of Heredity*, 4(1), 296-301. doi: 10.1093/jhered/os-4.1.296
- Silva, P. A., Cosme, V. S., Rodrigues, K. C. B., Detmann, K. S. C., Leão, F. M., Cunha, R. L., Pinheiro, H. A. (2017). Drought tolerance in two oil palm hybrids as related to adjustments in carbon metabolism and vegetative growth. *Acta Physiologiae Plantarum*, 39(2), 58. doi: 10.1007/s11738-017-2354-4
- Souza, T. C. de, Magalhães, P. C., Castro, E. M. de, Duarte, V. P., & Lavinsky, A. O. (2016). Corn root morphoanatomy at different development stages and yield under water stress. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(4), 330-339. doi: 10.1590/S0100-204X2016000400005
- Szaniawski, R. K. (1983). Adaptation and functional balance between shoot and root activity of sunflower plants grown at different root temperatures. *Annals of Botany*, 51(4), 453-459. doi: 10.1093/oxfordjournals.aob.a086490
- Trindade, D. R., Poltronieri, L. S., & Furlan, J., Jr. (2005). *Abordagem sobre o estado atual das pesquisas para a identificação do agente causal do amarelecimento fatal do dendezeiro. Pragas e doenças de cultivos amazônicos*. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental.
- Turner, P. D., & Planters, I. S. (1981). *Oil palm diseases and disorders*. Kuala Lumpur: Oxford University Press. Retrieved from <https://books.google.com.br/books?id=5-7wAAAAMAAJ>
- United States Department of Agriculture (2019). *Foreign Agricultural Service*. Retrieved from <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/ad>
- United States Department of Agriculture (2021). *Palm oil explorer*. Retrieved from <https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=4243000>
- Van Slobbe, W. G. (1991). *Amarelecimento fatal: final report*. Belém, PA: Denpasa .
- Venturieri, A., Fernandes, W. R., Boari, A. de J. A. D. J., & Vasconcelos, M. A. (2009). Relação entre ocorrência do amarelecimento fatal do dendezeiro (*Elaeis guineensis* Jacq.) e variáveis ambientais no Estado do Pará. *Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, RN, Brasil, 14.

## DISTRIBUIÇÃO DE BIOMASSA EM PLANTIO DE HÍBRIDO INTERESPECÍFICO DE PALMA DE ÓLEO

### Resumo:

A importância de se conhecer detalhadamente o sistema radicular de uma cultura está relacionada com estratégias técnico-científicas, tanto para tomadas de decisões técnicas (por exemplo, manejo), como também para estimar a contribuição no estoque e ciclagem de nutrientes no solo. O presente trabalho avaliou a biomassa abaixo do solo em um plantio comercial de híbrido interespecífico de palma de óleo (*Elaeis oleifera* cortés x *Elaeis guineensis* jacq.), cultivar BRS Manicoré, no município de Moju, nordeste do estado do Pará. O híbrido interespecífico de palma de óleo tem sido plantado em regiões com limitação para outras cultivares devido à ocorrência da anomalia amarelecimento fatal. Amostras de raízes foram obtidas por meio de coleta de monólitos em trincheiras com 4 metros de comprimento, 50 cm de largura e 290 cm de profundidade. Foram coletados monólitos em 8 camadas (2 – 15, 2 – 30 e 4 de 50 cm de profundidade) e em cada camada, foram coletados 8 monólitos medindo 50 cm de comprimento, 30 de largura e a altura de acordo com a camada coletada. Em laboratório, as raízes foram classificadas de acordo com seu diâmetro em primárias ( $\geq 5,0$  mm), secundárias (1– 4,9 mm), terciárias (0,5 – 0,9 mm) e quaternárias (0,25 – 0,49 mm). Imagens de subamostras de cada classe de diâmetro foram analisadas para estimativa do comprimento usando o software ImageJ. A massa seca das raízes foi determinada após secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 96 horas. A profundidade de 15-30 cm concentra mais de 50% da DMS total (50,77% TP e 59,91% TC), e destes, 81,49% da DMS é de raízes primárias. As terciárias representam 8,96% do total da DMS de TP e 4,85% de TC e a quantidade de raízes quaternárias na região entre plantas é 78,05% maior do que a quantidade encontrada na região de carreamento. O cultivo de palma de óleo com 8 anos de idade apresenta uma biomassa total de raízes superior à de culturas sazonais, vegetação secundária, cultivo Tradicional, cultivo de Maracujá e pimenta do reino.

## INTRODUÇÃO

A palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) é uma cultura de grande importância no setor agrícola do estado do Pará, com a maior produção entre as culturas permanentes (51% do total produzido no estado), ocupando mais de 140 mil hectares (FAPESPA, 2015; Glass, 2013). Como ocorre em todas as monoculturas extensivas desenvolvidas na região tropical úmida, o cultivo da palma de óleo também está sujeito à incidência acentuada de doenças e pragas (Medeiros & Sano, 1988).

No caso da cultura da palma de óleo, o Amarelecimento Fatal (AF) é um problema que engloba aspectos fitossanitários de extrema importância para a economia dos países que cultivam essa oleaginosa, em particular para o Brasil, onde vem causando perdas consideráveis desde 1984, e expandindo-se rapidamente na região. No estado do Pará, desde a primeira ocorrência descrita sobre o AF, em 1974, mais de 5.000 hectares de dendezaís foram erradicados por causa deste problema fitossanitário (Venturieri et al., 2009).

O principal agravante relacionado à limitação causada pelo AF está relacionado ao desconhecimento do seu agente etiológico. No entanto, há uma forte correlação entre incidência de AF e zonas de precipitações elevadas (Boari et al., 2012).

Uma alternativa para manter ou expandir a produção de palma de óleo em áreas de ocorrência do amarelecimento fatal é o uso de cultivares resistentes ao AF (Lopes et al., 2012), como, por exemplo, o híbrido interespecífico (BRS Manicoré) (Cunha & Lopes, 2010), atualmente sendo plantado em regiões de ocorrência do AF. A cultivar BRS Manicoré apresenta além de outras características uma produção de cachos equivalente ou superior aos valores descritos na literatura para cultivares de dendezeiro africano (Santos et al., 2015). A morfologia da parte aérea do BRS Manicoré difere daquela do híbrido intraespecífico (Cunha & Lopes, 2010; Gomes Junior, 2015), mas não há informações sobre a morfologia do seu sistema radicular. Um melhor entendimento sobre a distribuição horizontal e vertical de raízes do híbrido interespecífico é fundamental para se aperfeiçoar estratégias de manejo da

adubação, que atualmente se baseiam no conhecimento gerado para as cultivares africanas.

O Conhecimento acerca do sistema radicular também é importante para a quantificação do potencial de sequestro de carbono no solo da cultura, que representa uma informação relevante no cenário atual de busca por sistemas de produção com maior capacidade de mitigação de impactos de mudanças climáticas. A inserção do cultivo de palma de óleo em áreas degradadas pode fornecer um retorno de carbono logo a partir dos primeiros anos de cultivo, promovendo incremento no armazenamento do CO<sub>2</sub> atmosférico dentro deste novo ecossistema (Gibbs et al., 2008).

A maioria dos estudos sobre biomassa radicular da palma de óleo foram realizados na África ou na Ásia (Dufrene, 1989; Lamade & Setiyo, 1996; Jourdan et al., 2000; Rees & Tinker, 1963; Corley et al., 1971; Tailliez, 1971; Tan, 1979; Henson & Chai, 1997). No Brasil, não existem relatos científicos a respeito de biomassa de raízes de palma de óleo no Brasil em plantio convencional. Dessa forma, o objetivo foi avaliar a influência do manejo sob a distribuição horizontal e vertical da biomassa e do comprimento de raízes em um plantio comercial de HIE de palma de óleo de forma se obter parâmetros para tomada de decisão técnica e científica para o Híbrido interespecífico de palma de óleo.

## MATERIAL E MÉTODOS

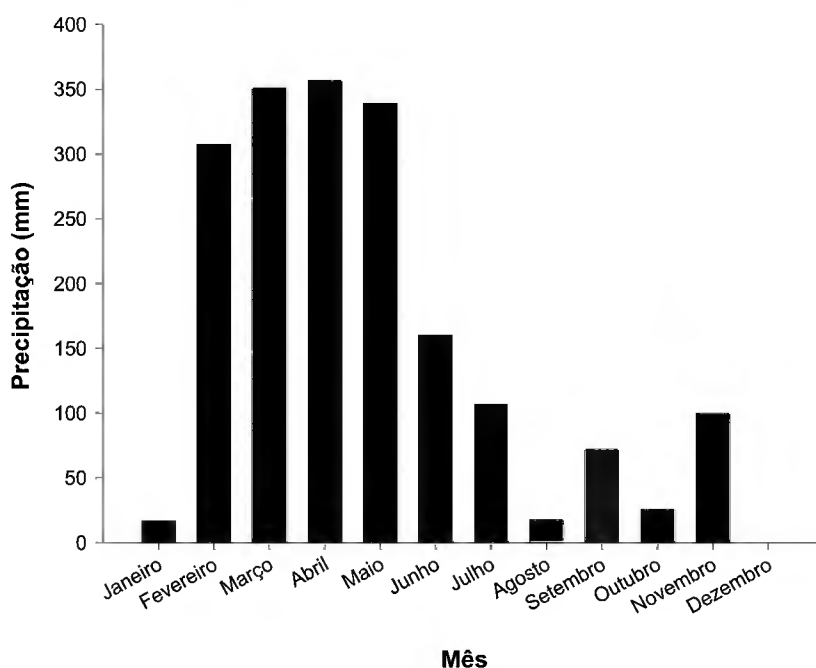
### CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

O estudo foi realizado na propriedade da empresa Marborges S/A (latitude 1°58'42" S e longitude 48°36'50" W), Município de Moju (Figura 1) Estado do Pará, entre setembro e novembro de 2015. O solo é do tipo Latossolo amarelo distrófico franco arenoso. As propriedades químicas e granulométricas foram determinadas de acordo com (Maciel, 2018) e estão descritas na tabela 1. O clima é do tipo equatorial, com pluviosidade média (1994 a 2010) de 2.890 mm, com estação mais chuvosa no primeiro semestre do ano (Figura 1).

Tabela 1 – Propriedades químicas e granulométricas da parcela C22, determinadas por Maciel (2018).adequar fonte e tabela unidades

Profundidade (cm)	Areia (g kg <sup>-1</sup> )	Silte (g kg <sup>-1</sup> )	Argila (g kg <sup>-1</sup> )	pH (água)	Al (Cmol dm <sup>-3</sup> )	H+Al (cmol c dm <sup>-3</sup> )	N (%)	P (mg dm <sup>-3</sup> )	K (mg dm <sup>-3</sup> )
0-20	728	92	180	5	0,4	3,8	0,07	35	27,37
20-40	615	125	260	4,9	0,7	3,1	0,04	6	15,64
40-60	581	99	320	4,9	0,7	2,8	0,03	2	11,73

Figura 1: Precipitação acumulada no ano de 2015 na área do experimento.



## HISTÓRICO DA ÁREA

O experimento foi conduzido na Parcela C22 (Figura 1), da empresa Marborges S/A, que constitui de um ensaio de progênies de Híbrido Interespecífico, cultivar BRS Manicoré, implantado em 2007. Este plantio foi realizado após a remoção de um cultivo de palma de óleo africana (*E. guineensis*), em 2007. As plantas foram retiradas e nos espaços entre plantas, onde havia a cultivar africana, foi realizado um novo plantio, sendo este com HIE BRS Manicoré, com diferentes materiais genéticos plantados em cada linha.

Os tratos culturais realizados na parcela C22 consistiram nas mesmas práticas culturais usadas em plantios do intraespecífico, incluindo roçagem mecanizada, realizada 2 vezes ao ano, e controle químico de invasoras anualmente. A frequência da poda das folhas foi de 2 vezes ao ano. A colheita foi realizada a cada 12-15 dias, sendo os cachos removidos do plantio por meio de tração animal. Anualmente, é feita 3 adubações com base na análise foliar na quantidade descrita na tabela 2, sendo estes nutrientes distribuídos mecanicamente na região entre plantas. A polinização assistida, prática necessária em plantios de HIE, foi realizada a cada dois dias.

Tabela 2 - Quantidade de nutrientes aplicados nas áreas de plantio de palma de óleo com 8 anos de idade. Os valores são em Kg de nutriente por ha.

Nutrientes aplicados (Kg ha <sup>-1</sup> )						
Ano	N	P <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	S
2013	40,5	78,2	101,2	15	8,1	8,1
2014	50,2	76,2	300,4	18,6	21,3	60,2
2015	42,4	61,8	173,6			

### COLETA DE RAÍZES

Em agosto de 2015, foram selecionadas ao acaso 4 plantas, com atributos morfológicos e vegetativos similares, sendo cada planta de famílias distintas.

Para a coleta de raízes foi utilizado o método dos monólitos (Böhm, 1979). Com o intuito de verificar a influência do manejo sob o desenvolvimento radicular, foram escavadas duas trincheiras por planta (total de 8 trincheiras), sendo uma entre plantas (TP) e outra perpendicular ao carreador (TC) (Figura 4). As trincheiras foram escavadas com retroescavadeira acoplada a um trator. Cada trincheira com 4 metros de comprimento, 50 centímetros de largura e 2,9 metros de profundidade.

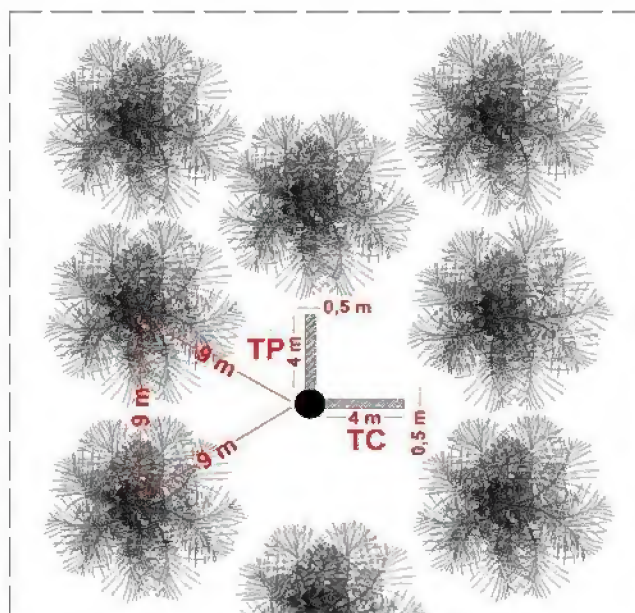


Figura 2: Vista superior da disposição das trincheiras em relação as plantas de palma de óleo. Sendo TP, trincheira entre plantas e TC, trincheira do carreador.

Para cada trincheira, foram retirados monólitos de 50 cm de comprimento e 30 cm de largura, coletados em diferentes camadas ao longo do perfil e



também a diferentes distâncias a partir da base da planta (Figura 5). Dessa forma, foram coletados 8 monólitos em cada camada nas profundidades 0-15 cm, 15-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm, 90-140, 140-190, 190-240 e 240-290 cm.

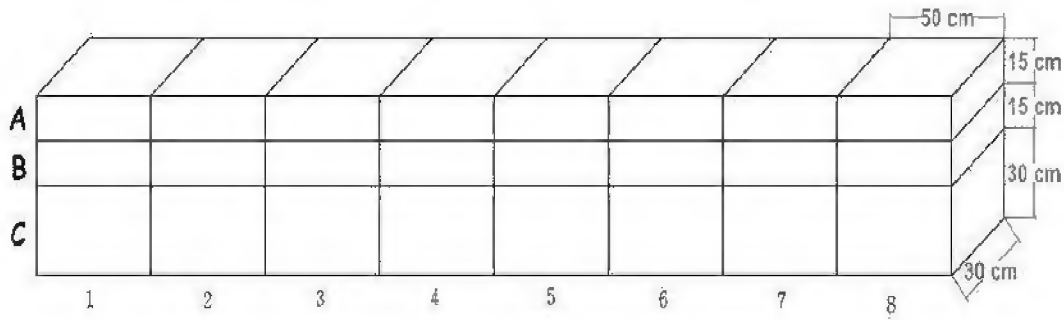


Figura 3: Desenho esquemático da disposição dos monólitos coletados na trincheira e dimensões. Sendo A camada de 0-15 cm, B, Camada de 15-30, C, camada de 30-60 cm, D, camada de 60-90, de E a H, aumenta a cada 50 cm até 290 cm. Os números de 1 a 8, representam o número do monólito coletado, sendo estes retirados a cada 50 cm de distância em relação a planta.

Uma vez coletados, os monólitos foram mantidos em sacos de 60 kg tipo rafia em local sombreado e arejado. Em no máximo 3 dias após a coleta, as amostras foram colocadas sobre uma tela com 1 m<sup>2</sup> de área e malha de 2 mm e lavadas com jato de água corrente com pressão moderada para minimizar danos às raízes.

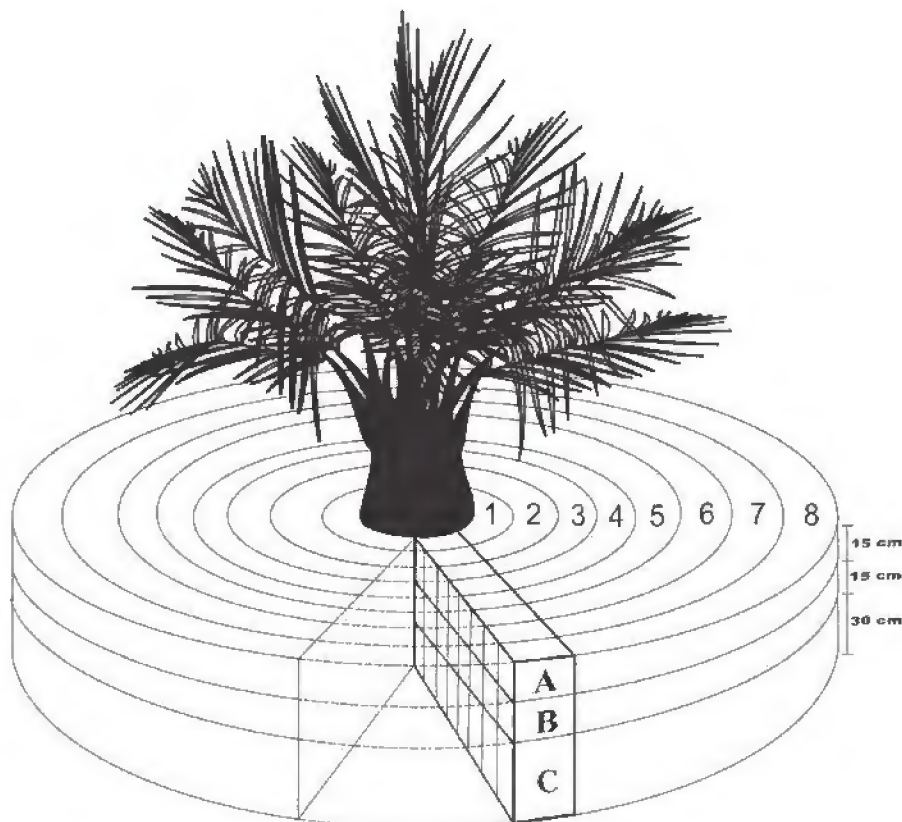
Após a remoção do solo, todo material vegetal retido na malha de 2 mm foi armazenado em sacos plásticos e mantido sob refrigeração (aproximadamente 4° C) até o processamento no Laboratório de Análise de Sistemas Sustentáveis (LASS) da Embrapa Amazônia Oriental, em Belém.

O processamento em laboratório consistiu de separação, secagem em estufa de circulação forçada de ar e pesagem das raízes. Estas, foram separadas em quatro classes de diâmetro, sendo classificadas em primárias (diâmetro entre 5 e 10 mm), secundárias (diâmetro entre 1 e 4,9 mm), terciárias (diâmetro entre 0,5-0,9 mm) e quaternárias (diâmetro entre 0,25-0,49 mm). A classificação das raízes nessas classes de diâmetro foi baseada em uma adaptação de Corley & Tinker (2015). Após a separação, uma subamostra de raízes (de aproximadamente 100 g) obtidas de cada monólito foi digitalizada com *scanner* (Marca Canon, Modelo 280 pix), gerando imagens (resolução 319x418 dpi) das raízes de cada classe de diâmetro. As imagens foram editadas para conversão em imagens binárias e posteriormente processadas no programa IMAGEJ® V1.4, com auxílio do Plugin Smartroot, para determinação do comprimento radicular. Finalmente, todas as

amostras (incluindo as subamostras usadas para determinação do comprimento) foram secadas em estufa, a 65 °C, por 96 horas e pesadas em uma balança com precisão de quatro casas decimais.

Os valores estimados pelo software ImageJ® foram ajustados usando-se fatores de correção (35.367; 35.367; 39.300 e 39.335 pixel/cm) para as raízes primárias, secundárias, terciárias e quaternárias. Utilizamos o plugin SmartRoot do ImageJ, e por meio da ferramenta Trace Root ao invés do modo Automatic Drawing, pois a primeira foi mais precisa e específica na análise de fragmentos de raízes finas e muito finas, os quais não foram detectados no modo Automatic Drawing. Para estimar o comprimento total, utilizamos a seguinte equação:  $L_t = \frac{L_{sa} \times M_t}{M_{sa}}$ , sendo  $L_t$  o comprimento total,  $L_{sa}$  o comprimento da subamostra,  $M_t$  massa seca total (amostra+subamostra) e  $M_{sa}$  a massa seca da subamostra.

Os valores de massa seca de raízes de cada monólito foram usados para estimar a massa total de raízes de cada planta, assumindo-se que a distribuição do sistema radicular é homogêneo ao redor da planta. A extrapolação do valor do monólito para o total ao redor da planta foi realizado de acordo com Cuesta et al. (1997), com base em anéis (coroas circulares) delimitados por dois círculos concêntricos de “espessura” igual ao comprimento do respectivo monólito (Figura 4).



A partir da massa seca de raízes presente em cada volume de monólito ( $\text{cm}^3$  de solo), foi calculada a densidade de massa de raízes (DMS) e a densidade de comprimento de raízes (DCR). O volume total do anel correspondente a um dado monólito foi calculado com a equação  $V = (\pi \times R^2 - \pi \times r^2) \times h$ , em que:  $R$  é a distância do maior anel em relação a planta,  $r$  é a menor distância da circunferência e  $h$  é a profundidade.

Figura 4 – Figura esquemática dos anéis concêntricos segundo Cuesta et al., (1997).

### **Análise Estatística**

A densidade de massa de raízes foi expressa em  $\text{mg}/\text{cm}^3$  e a densidade de comprimento de raízes em  $\text{mm}/\text{cm}^3$ . A biomassa total de raízes foi expressa em  $\text{kg planta}^{-1}$  e  $\text{Mg ha}^{-1}$ , e o comprimento total de raízes foi expresso em  $\text{km/planta}$  e  $\text{km/ha}$ . Com ANOVA de dois critérios, foram testados os efeitos de distância da palma, profundidade do solo e interação entre distância e profundidade sobre a densidade de massa e de comprimento de raízes, separadamente para cada classe de raiz.

Quando necessário, os dados foram transformados (raiz quadrada ou Log10) para atender aos requisitos de normalidade e homogeneidade de variância da estatística paramétrica. A análise não-paramétrica (teste Shapiro-Wilk) foi usada quando os dados transformados não atenderam os requisitos da estatística paramétrica. Para comparação de médias, aplicou-se o teste Tukey ( $p \leq 0,05$ ). As análises foram conduzidas com o *software* SigmaPlot 14.0.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Densidade de Massa de Seca (Dms) de Raízes**

Em se tratando de biomassa, a profundidade de 0-290 cm é composta predominantemente de raízes primárias, pois estas representam cerca de 41,91% da DMS total na região entre plantas (TP) e 60,64% no carreamento (TC). Porém, mais de 60% da DMS total das raízes primárias estão concentradas nos primeiros 30 cm de profundidade do solo (Tabela 3), que é o inverso do que ocorre nas raízes secundárias, que com exceção da camada de 0-90 cm, em

todas as raízes secundárias concentraram mais de 60% da DMS. Na camada mais superficial (0-15 cm), a DMS de TC, tanto de secundárias como de primárias, não apresentou diferença significativa em relação à TP, com exceção das distâncias 150-200 e 300-350 cm da planta (Figura 5) nas primárias e 50-100 cm nas secundárias. A presença de maior quantidade de raízes nestas distâncias em comparação com TP pode estar relacionada a maior compactação do solo. De acordo com Materechera et al. (1992), a resistência mecânica do solo causa aumento do diâmetro das raízes na camada compactada e pode provocar modificações morfológicas e fisiológicas na planta a fim de se adaptarem. Em um estudo realizado na Malásia, verificou-se que a redução da biomassa total de raízes foi de 28% (Yahya et al., 2010).

Isso é mais evidente na profundidade de 15-30 cm, a qual concentra mais de 50% da DMS total (50,77% TP e 59,91% TC), e que destes, 81,49% da DMS é de raízes primárias, o que representa uma redução de 20,51% na DMS das outras classes de raízes (Secundária, Terciária e Quaternária). Neste perfil, a partir de 100 cm da planta (100-400 cm), a DMS de primárias de TC foi significativamente maior em relação a TP. Devido à grande concentração de raízes primárias na camada de 15-30 cm, esperava-se encontrar uma maior DMS de secundárias também nesta camada, o que não foi verificado. Isso levanta a hipótese de que na região entre plantas, considerada uma região sem impacto do manejo, possui uma DMS de raízes primárias menor do que a região de carreamento, mas com maior número de ramificações (raízes secundárias). Estas, que também exercem a função de sustentação da planta, são de onde as raízes de absorção (terciárias e quaternárias) crescem.

Na profundidade de 30-60 cm, de forma geral, a DMS de primárias em TC foi maior em comparação com a TP, com exceção das distâncias de 200-250 e 250-300 cm em que as DMS não foram diferentes entre as Trincheiras. Em contrapartida, a DMS de secundárias nesta profundidade não apresentou diferença estatística entre as regiões avaliadas, com exceção da distância 250-300 cm, a qual a DMS de TC é superior a de TP (Figura 6). A partir das profundidades de 60cm, há uma diminuição destas diferenças entre as trincheiras, de tal forma que apenas uma ou duas distâncias foram diferentes estatisticamente em cada profundidade avaliada, sendo que em todas, a trincheira de carreamento apresentou maior valor de DMS.

As raízes terciárias, assim como as quaternárias, são responsáveis pela absorção de água e nutrientes (Corley & Tinker, 2016), ou seja, uma maior ou menor concentração destas raízes podem direcionar as práticas de manejo da cultura da palma de óleo. No perfil de 0-290 cm, as terciárias representam 8,96% do total da DMS de TP (Tabela 4) e 4,85% de TC (Tabela 5) Ou seja, na região entre plantas, a DMS de terciárias é 62,11% maior que no carreamento o que representa cerca de 304 kg ha<sup>-1</sup> a mais de raízes terciárias na região entre plantas. Essa diferença é ainda maior quando comparamos a DMS de raízes quaternárias, pois estas representam 8,96% (6,09 Kg planta<sup>-1</sup>) para TP e 4,85 % (3,42 kg planta<sup>-1</sup>) para TC. Ou seja, a quantidade de raízes quaternárias na região entre plantas é 78,05% maior do que a quantidade encontrada na região de carreamento, o que representa cerca de 2,67 kg planta<sup>-1</sup> de raízes quaternárias.

Essa diferença de DMS de terciárias e quaternárias entre TC e TP é mais evidente nos perfis mais superficiais (0-30 cm), com os valores de TP significativamente superiores em relação aos de TC na distância 0-400 cm e 50-300 cm para terciárias e 0-200, 250-300 e 0-400 cm para quaternárias, nas profundidades de 0-15 e 15-30cm respectivamente (Figura 7). Outra camada em que a DMS de quaternárias e terciárias de TP é predominantemente superior ao de TC é nas camadas de 90-240.

Já na camada de 30-60, esta diferença entre as duas regiões, tanto DMS de terciárias quanto de quaternárias não se manifestam da mesma forma que nas camadas mais superficiais, visto que apenas na distância de 100-150 cm de terciárias e 200-250 em quaternárias que a DMS de TP é superior a TC. Já na profundidade de 60-90, as distâncias de 0-50 e 100-150 apresentaram uma DMS maior de TC em relação a TP e nas distâncias de 200-250 e 300-350 os valores de DMS de TP foram maiores que TC, sendo as demais distâncias iguais estatisticamente. Na profundidade de 90-140 cm, a DMS das distâncias de 0-300 cm da TP foi superior a TC. Na camada de 140-190, as distâncias de 0-200 e 350-400 a DMS de TP. De forma geral, a maior DMS de raízes na TP em relação a TC se concentram principalmente na distância de 0-200 da planta, tanto de terciárias quanto de quaternárias.

#### **Densidade de comprimento de raízes (DCR)**

Mais de 60% da DCR de raízes se encontra nos primeiros 30 cm de profundidade, tanto de TC quanto de TP. Ao contrário do que acontece com valores de DMS, na densidade de comprimento de raízes (DCR) as raízes primárias não são representativas dentro do perfil de 0-290 cm. Estas, representam apenas 6,07 % (18,6 km planta<sup>-1</sup>) e 12,39 % (28,97 km planta<sup>-1</sup>) de em TP e TC respectivamente. Ou seja, em TC a quantidade de raízes primárias é 104,2% maior que TP. Essa diferença é mais visível nos primeiros 60 cm de profundidade, pois com exceção da distância 0-50 cm da profundidade de 0-15, e 200-250cm na camada de 30-60 cm. Nas demais distâncias da camada 0-60 cm, os valores de DCR de primárias de TC são maiores que TP. Isso mostra que as raízes primárias. Já a DCR de secundárias, que representam 22,65% (69,47 planta<sup>-1</sup> Km) da DCR total em TP e 36,29% (84,84 planta<sup>-1</sup> Km) em TC. Avaliando as diferenças mais expressivas entre as duas regiões de manejo. Na camada mais superficial (0-15) a DCR de TC foi maior que a TP nas distâncias de 50-200 cm, e na camada de 15-30 cm foi maior que TP na distância de 100- 300 cm (Figura 8).

Outra camada que apresentou diferença significativa entre as duas regiões (com e sem influência do manejo) foi a camada de 140-190 cm, sendo que distância de 150-300 cm da planta apresentou uma DCR de TP superior a de TP. De forma geral, a camada de 0-60 cm a DCR de primárias e secundárias são maiores que em TC do que em TP (concentra 76,6 e 78,4% da DCR total em TP e TC respectivamente), sendo essa diferença não evidenciada nos resultados de DMS. Isso mostra que as raízes, tanto primárias quanto secundárias, presentes na região de carreamento, podem apresentar um diâmetro menor em relação às raízes da região entre plantas. Na região de compactação, ocorre uma redução da densidade de comprimento de primárias em em torno de 23% e 19% (Yahya et al., 2010). O alongamento radicular só é possível quando a pressão de crescimento das raízes for maior do que a resistência mecânica do solo à penetração (Passioura, 1991).

As raízes terciárias e quaternárias, apesar de não apresentarem uma maior representatividade nos valores de DMS, sem dúvida são as classes de raízes de maior interesse agrícola, sendo estas responsáveis pela busca por recursos. A densidade de comprimento radicular destas classes de raízes mostra o potencial que uma planta apresenta na busca por água e nutrientes. As terciárias representam cerca de 30,79% e 26,46% do total de DCR no perfil de

0-290cm em TP e TC, respectivamente. A região entre plantas apresenta uma DMS com cerca de 52% maior em relação a TC, porém, essa superioridade é mais evidente quando comparamos a DCR de raízes quaternárias entre TP e TC, pois a DCR de TP possui 119,23 km de raízes por planta, enquanto que a 55,78 Km por planta. Uma diferença de cerca de 113% a mais de DCR de quaternárias de TP em relação a TC.

De forma geral, a superioridade de raízes quaternárias na região entre plantas se repete nos resultados de DCR. Entretanto, um ponto a ser observado é em relação à comparação dos resultados de DMS de quaternária com a DCR, em que algumas distâncias avaliadas em que não haviam diferença estatística de DMS entre as duas trincheiras, apresentaram resultados de DCR de TP superiores aos de TC. Isso pode ser verificado principalmente na profundidade de 15-190 cm nas distâncias de 0-50 e 300-400, profundidade de 15-30 cm nas distâncias de 0-100, e na profundidade de 60-90 cm nas distâncias de 0-50, 100-150 e 250-300 em 60-90, 300-400 em 90-140. Estes resultados reforçam a hipótese de que na região de carreamento, as raízes apresentam maior diâmetro em relação às raízes entre plantas, pois se em uma distância não apresenta diferença entre a DMS, mas esta diferença se manifesta no resultado de DCR, isso significa que aquela raiz apresentou uma determinada massa em virtude do seu maior diâmetro. Na Malásia, o efeito da compactação através de 4 toneladas proporcionou um aumento no diâmetro radicular das primárias em torno de 10% e de secundárias, próximo a 11%, devido ao alongamento radicular ser fortemente afetado pela compactação do solo (Yahya et al., 2015). O diâmetro médio radicular das plantas de milho aumentou significativamente na camada de solo compactado com o aumento da resistência mecânica à penetração. Dentro da camada de solo compactado, o diâmetro médio radicular da soja aumentou (Foloni et al., 2006; Foloni et al., 2003).

### **Biomassa e comprimento total**

Considerando que a região de TC fosse uniforme ao redor da planta, e TP uniforme ao redor de outra planta, A biomassa total de raízes representa 85,63 kg planta<sup>-1</sup> de TP, e 114,36 kg planta<sup>-1</sup> de TC (Tabela 4), o que representa uma diferença de 4,1 Mg ha<sup>-1</sup>. Esta superioridade de massa de raízes no carreamento dá a entender que esta região possui potencial de absorção maior que o que da

região entre plantas. No entanto, TP possui 1,97 Mg ha<sup>-1</sup> de raízes de absorção (Terciárias e Quaternárias), enquanto que TC possui 1,28 Mg ha<sup>-1</sup>. Esse potencial da região entre plantas é mais nítido quando se avalia o comprimento total de raízes, pois na região de TC apresenta apenas 505,13 Km planta<sup>-1</sup>, enquanto que na região de TP, possui 687,91 Km, sendo destes, 533,57 Km de terciárias e quaternárias, enquanto que na região de TC possui 334,57 Km planta<sup>-1</sup>, o que representa uma diferença de 199 Km planta<sup>-1</sup> de raízes de absorção.

Em relação a outros estudos de biomassa de raízes de palma de óleo, cujas medições foram realizadas até no máximo 100 cm de profundidade, verificou-se que a biomassa de raízes do HIE até essa profundidade apresenta valores bem superiores aos encontrados para cultivares de intraespecífico (*Elaeis guineenses*). Khalid et al. (1999) encontrou valores de biomassa abaixo do solo de 16,5 Mg/ha em palma de óleo de 23 anos a uma profundidade de 0-60 cm (Tabela 6). Em estudo avaliando a biomassa radicular de palma de óleo na Colômbia, Cuesta et al. (1997) encontraram uma biomassa abaixo do solo (camada 0-60 cm) de 2,36 Mg/ha para palma de óleo de 5 anos e 8,60 Mg/ha para palma de óleo de 8 anos. Neste estudo, o HIE apresentou uma biomassa total de 14,30 (média de TC e TP), bem mais que os cultivares Tenera na mesma idade (8 anos). Comparando com outras culturas, quando o cultivo de palma de óleo atinge 8 anos, sua biomassa de raízes (considerando a média de TP e TC) é superior à de culturas sazonais (1 ano), de vegetação secundária (1 anos), de cultivo tradicional (15 meses), cultivo de maracujá e de pimenta do reino (Tabela 7)

## **Conclusão**

As regiões de influência negativa (tráfego de máquinas e pisoteio) do manejo afetam consideravelmente a biomassa e o comprimento de raízes de absorção.

As regiões de TC apresentaram raízes com maior massa, porém com menor comprimento, o que pode ser resultado de uma mudança no diâmetro radicular.

A distribuição da massa total e do comprimento total, varia com a classe de diâmetro, com os seguintes padrões para densidade de massa de raízes (primárias>secundárias>terciárias>quaternária) e com a densidade de



comprimento de raízes (quaternária>terciárias>secundárias>primárias).

A densidade de massa de raízes se concentra nos primeiros 30 cm de solo (92,41% da DMR total).

A biomassa de raízes do HIE é superior à de culturas sazonais, à de vegetação secundária (1 anos), à de cultivo tradicional, cultivo de maracujá e de pimenta do reino.

### DMS PRIMÁRIAS

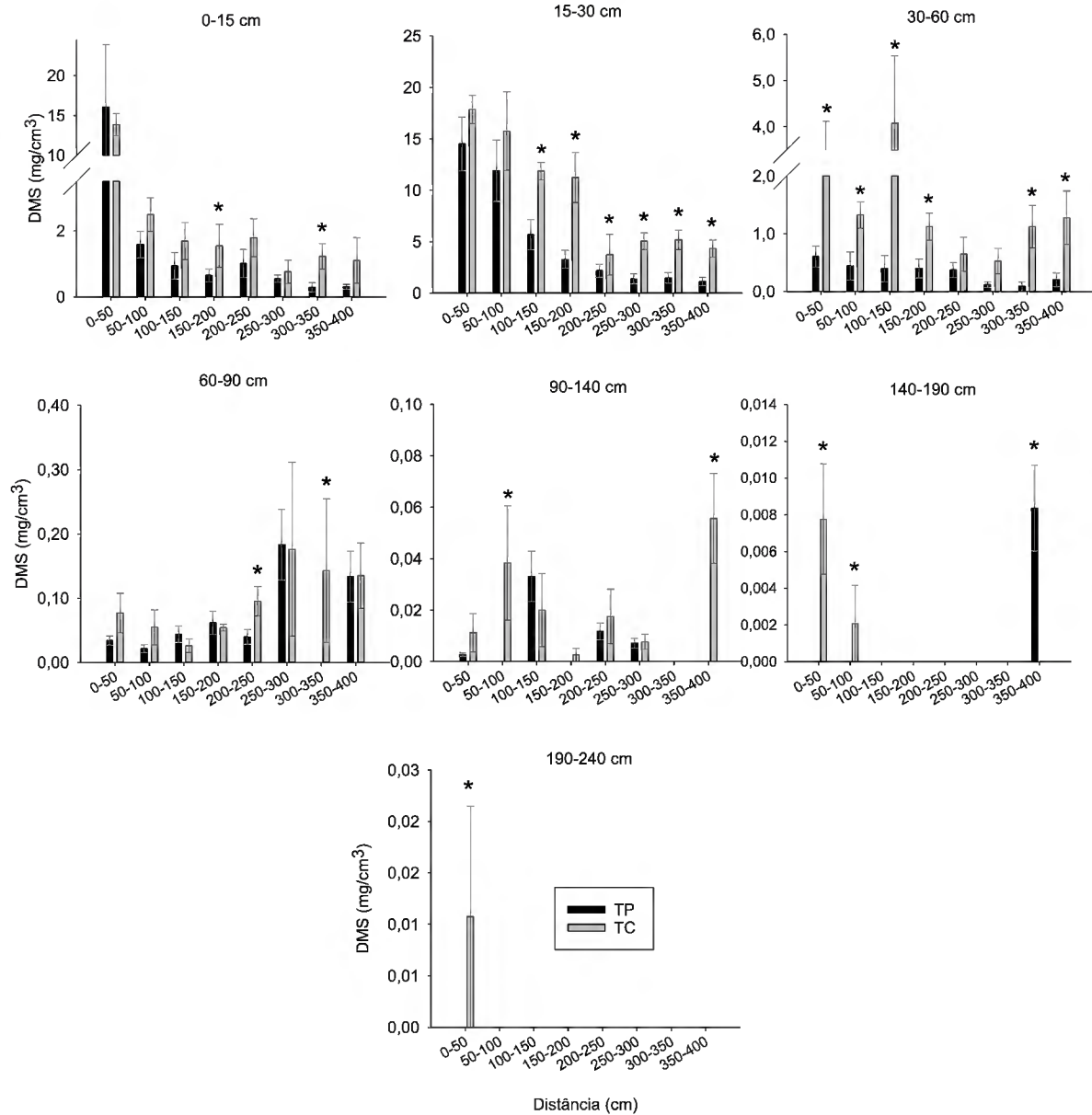


Figura 5 - Densidade de massa de raízes primárias ( $\Phi \geq 5$  mm) em função das distâncias (0-400 cm) comparando trincheira entre plantas (TP) e trincheira entre carreamento (TC). Dados são média e asteriscos indicam diferença estatística (tukey a 5%). Barra o erro padrão da média

### DMS SECUNDÁRIAS

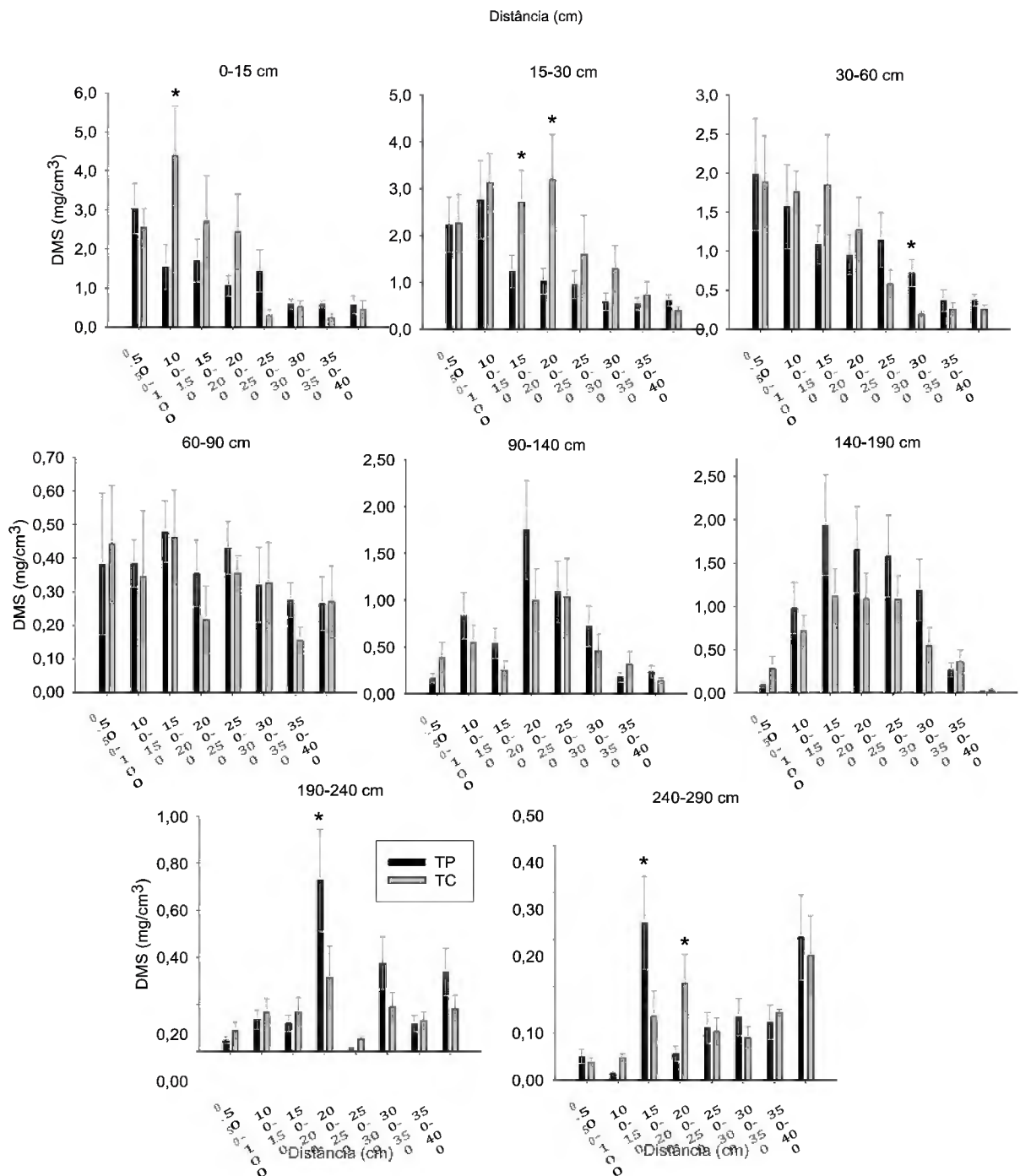


Figura 6 - Densidade de massa de raízes secundárias ( $\Phi$  1 - 4,99 mm) em função das distâncias (0-400 cm) comparando trincheira entre plantas (TP) e trincheira entre carreamento (TC). Dados são médias e asteriscos indicam diferença estatística tukey a 5%.

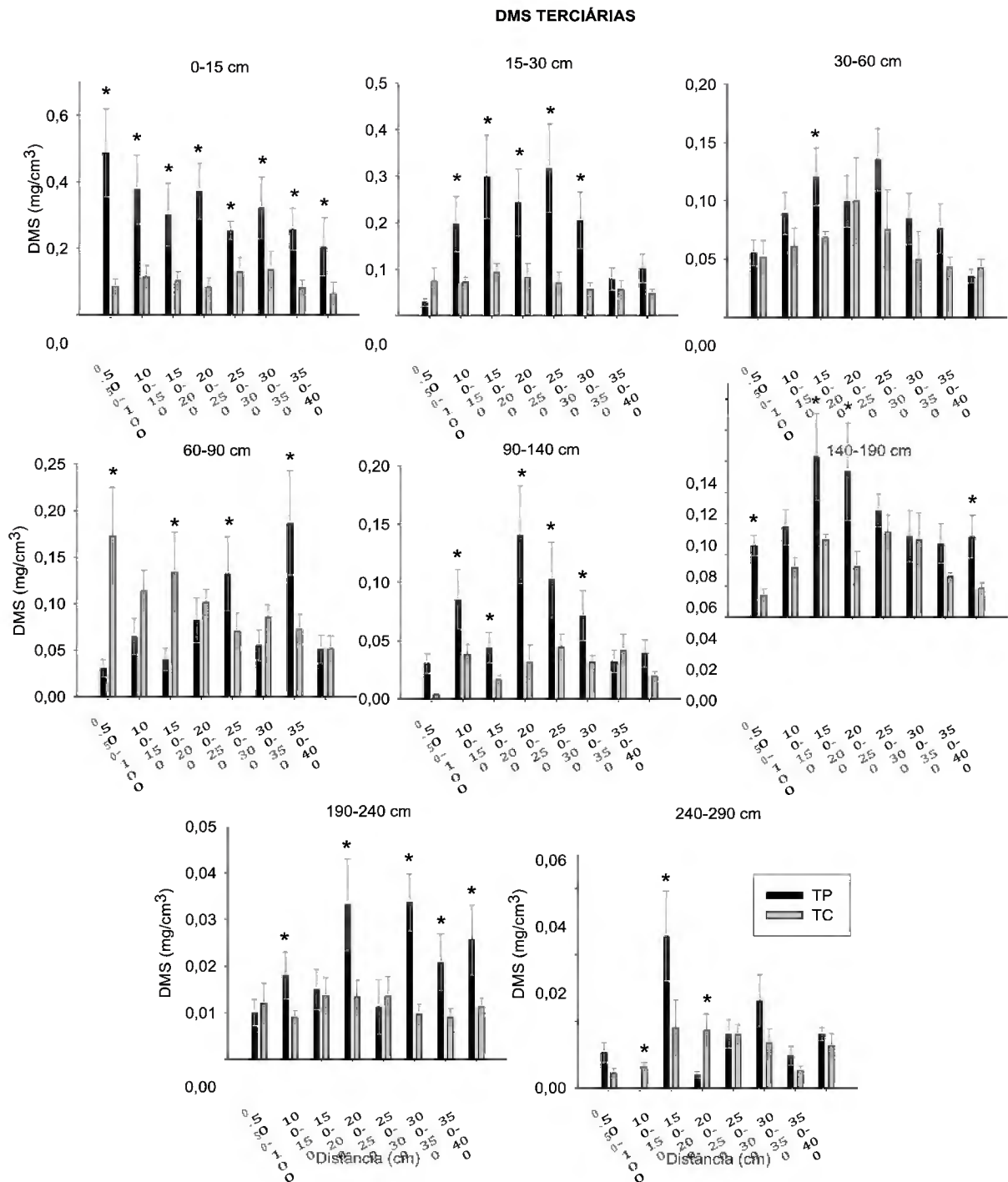


Figura 7 - Densidade de massa de raízes terciárias ( $\Phi$  0,5 – 0,99 mm) em função das distâncias (0-400 cm) comparando trincheira entre plantas (TP) e trincheira entre carreamento (TC). Dados são médias e asteriscos indicam diferença estatística (tukey a 5%).

DMS QUATERNÁRIAS

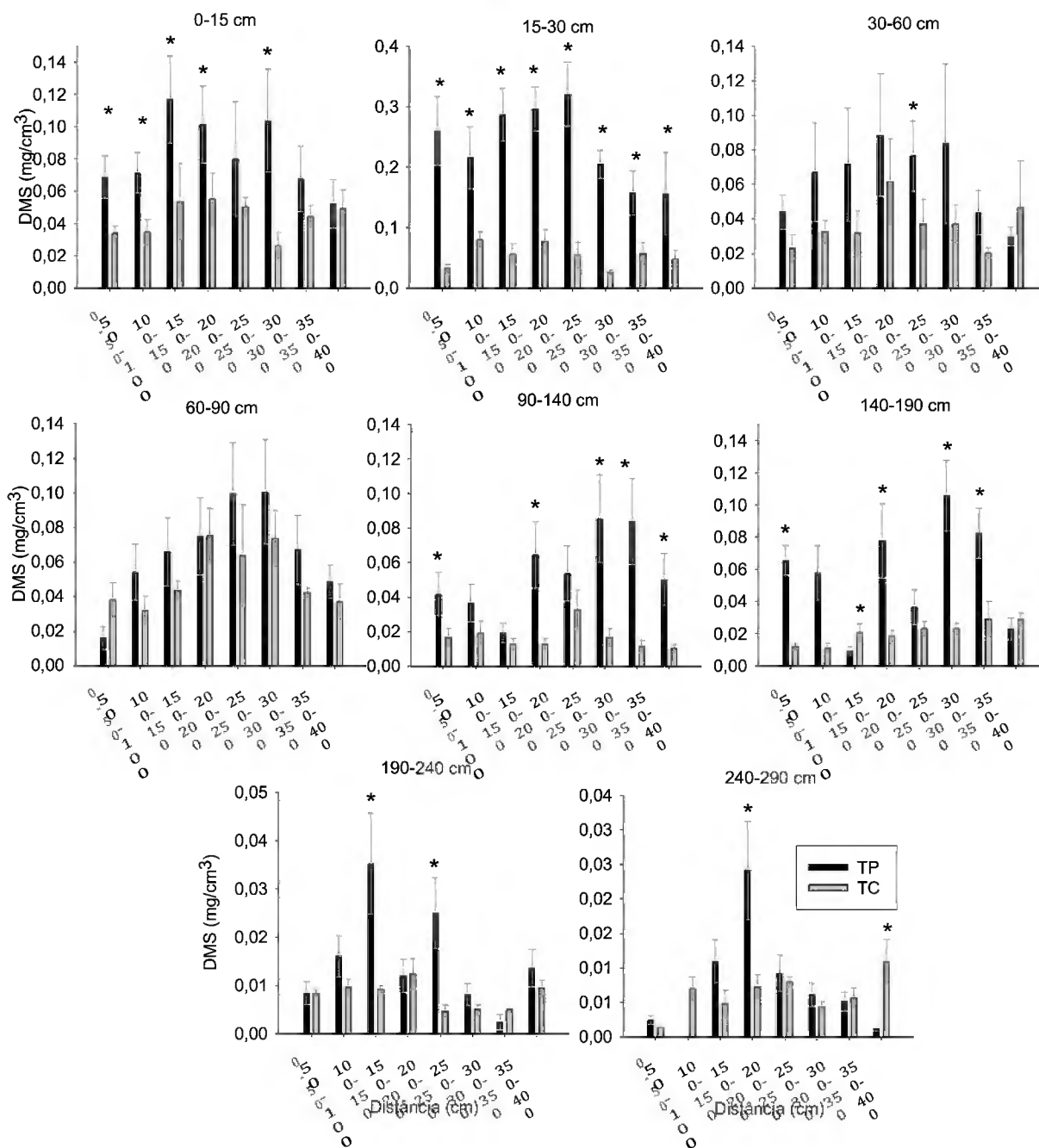


Figura 8 - Densidade de massa de raízes quaternárias ( $\Phi$  0,25 - 0,49 mm) em função das distâncias (0-400 cm) comparando trincheira entre plantas (TP) e trincheira entre carreamento (TC). Dados são médias e asteriscos indicam diferença estatística (tukey a 5%).

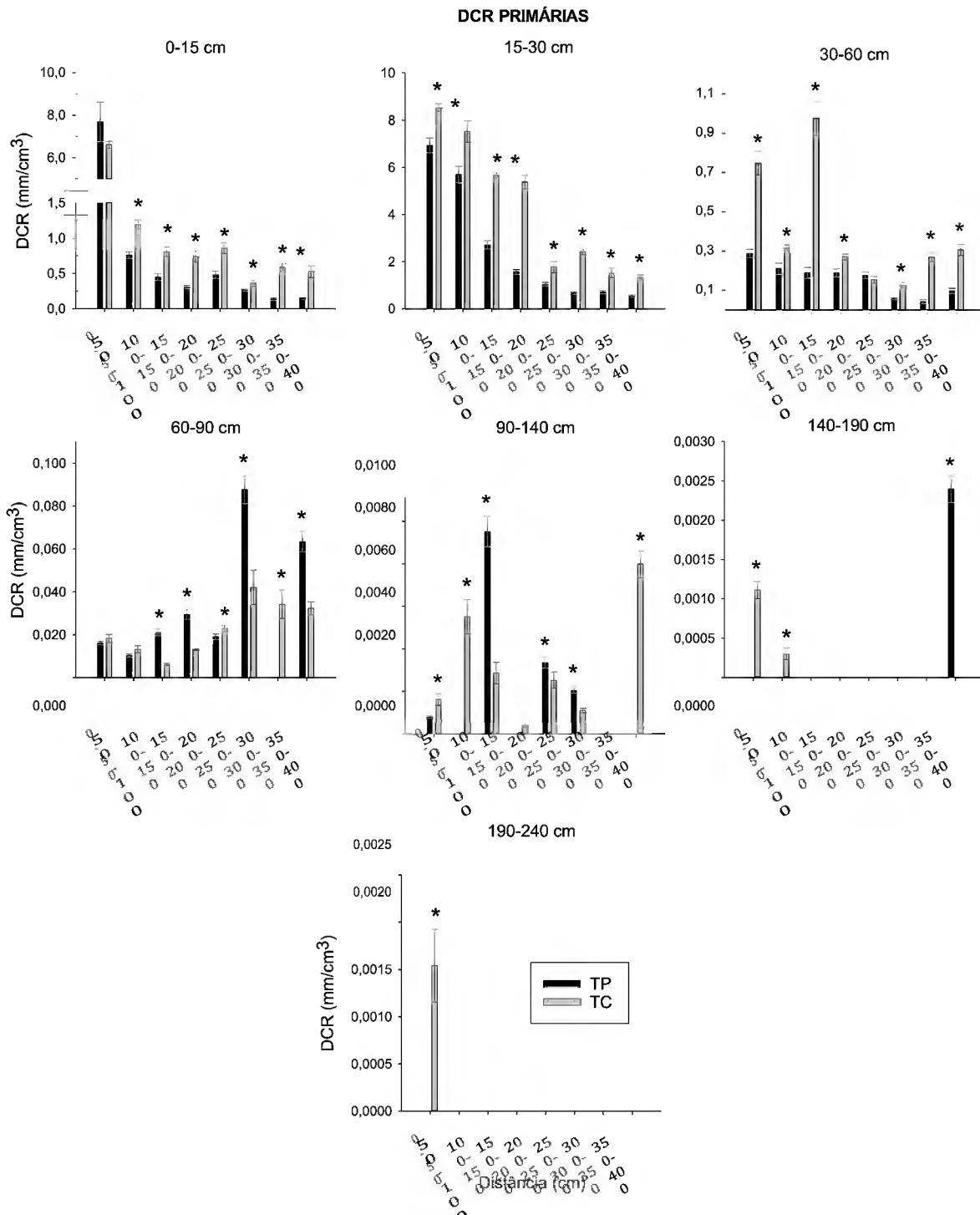


Figura 9 - Densidade de comprimento de raízes primárias ( $\Phi 1 \geq 5$  mm) em função das distâncias (0-400 cm) comparando trincheira entre plantas (TP) e trincheira entre carregamento (TC). Dados são médias e asteriscos indicam diferença estatística (tukey a 5%).

### DCR SECUNDÁRIAS

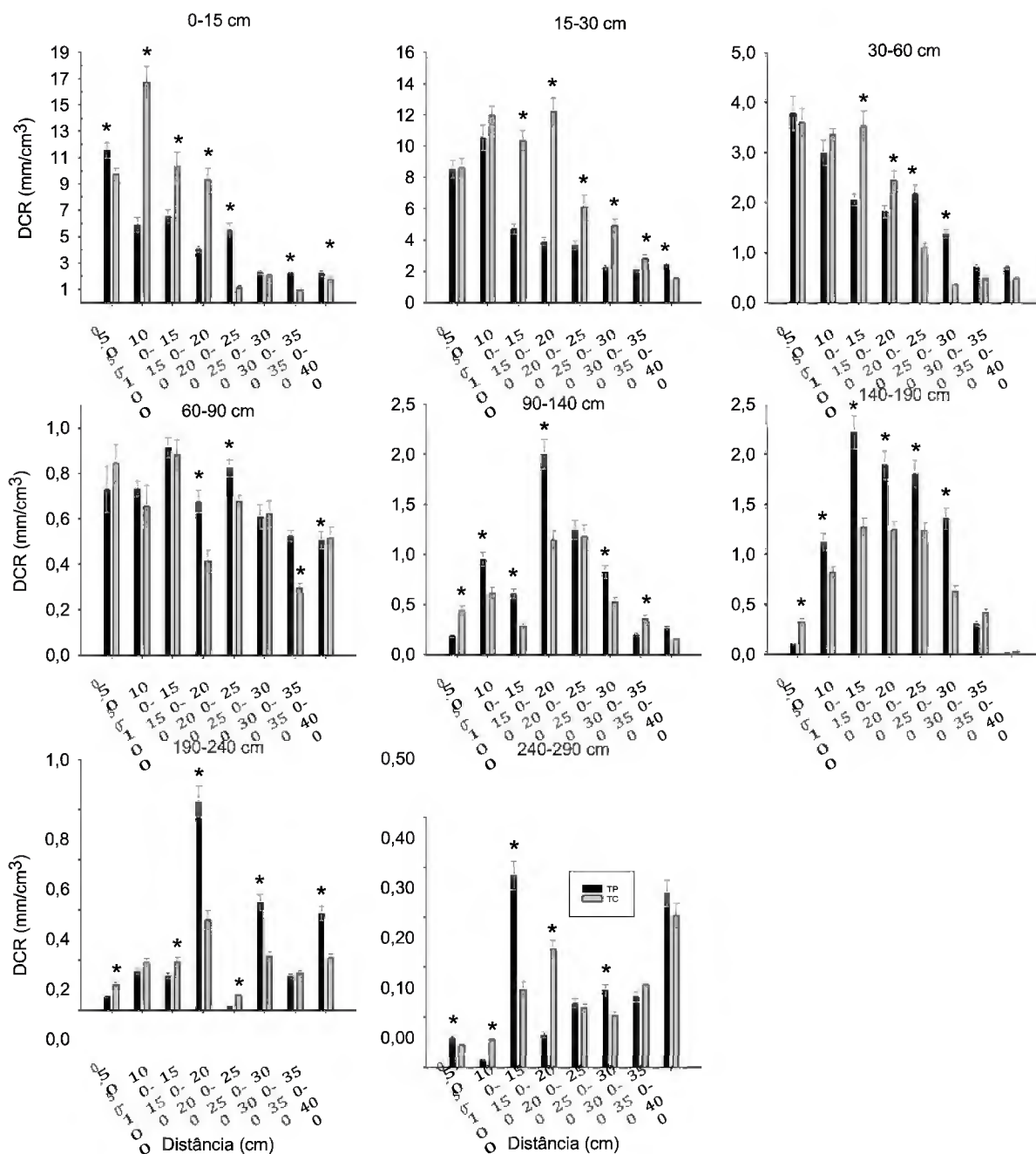


Figura 10 - Densidade de massa de raízes secundárias ( $\Phi$  1 - 4,99 mm) em função das distâncias (0-400 cm) comparando trincheira entre plantas (TP) e trincheira entre carreamento (TC). Dados são médias e asteriscos indicam diferença estatística (tukey a 5%).

### DCR Terciárias

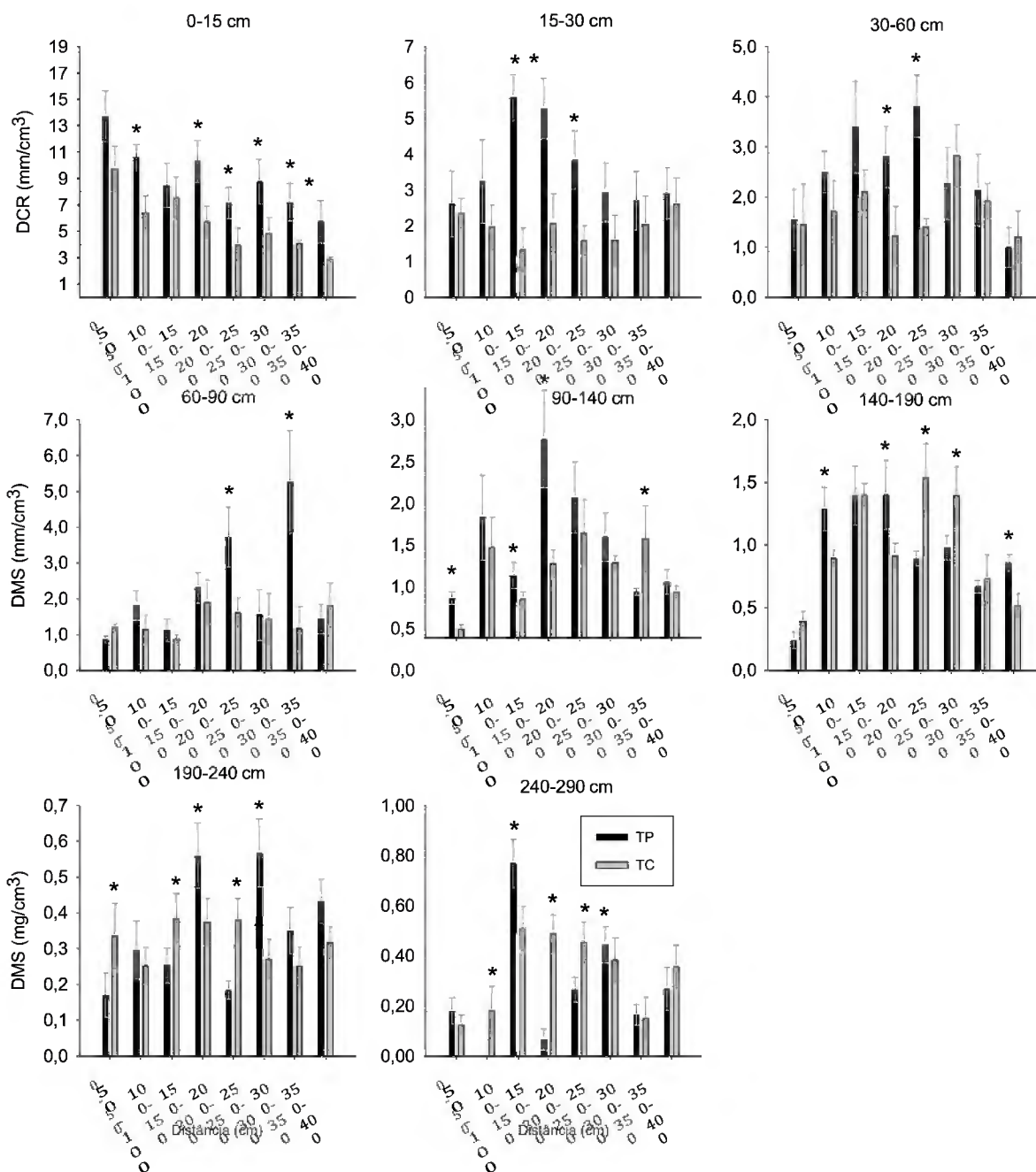


Figura 11 - Densidade de comprimento de raízes terciárias ( $\Phi$  0,5 - 0,99 mm) em função das distâncias (0-400 cm) comparando trincheira entre plantas (TP) e trincheira entre carregamento (TC). Dados são médias e asteriscos indicam diferença estatística (tukey a 5%).



### DCR QUATERNÁRIAS

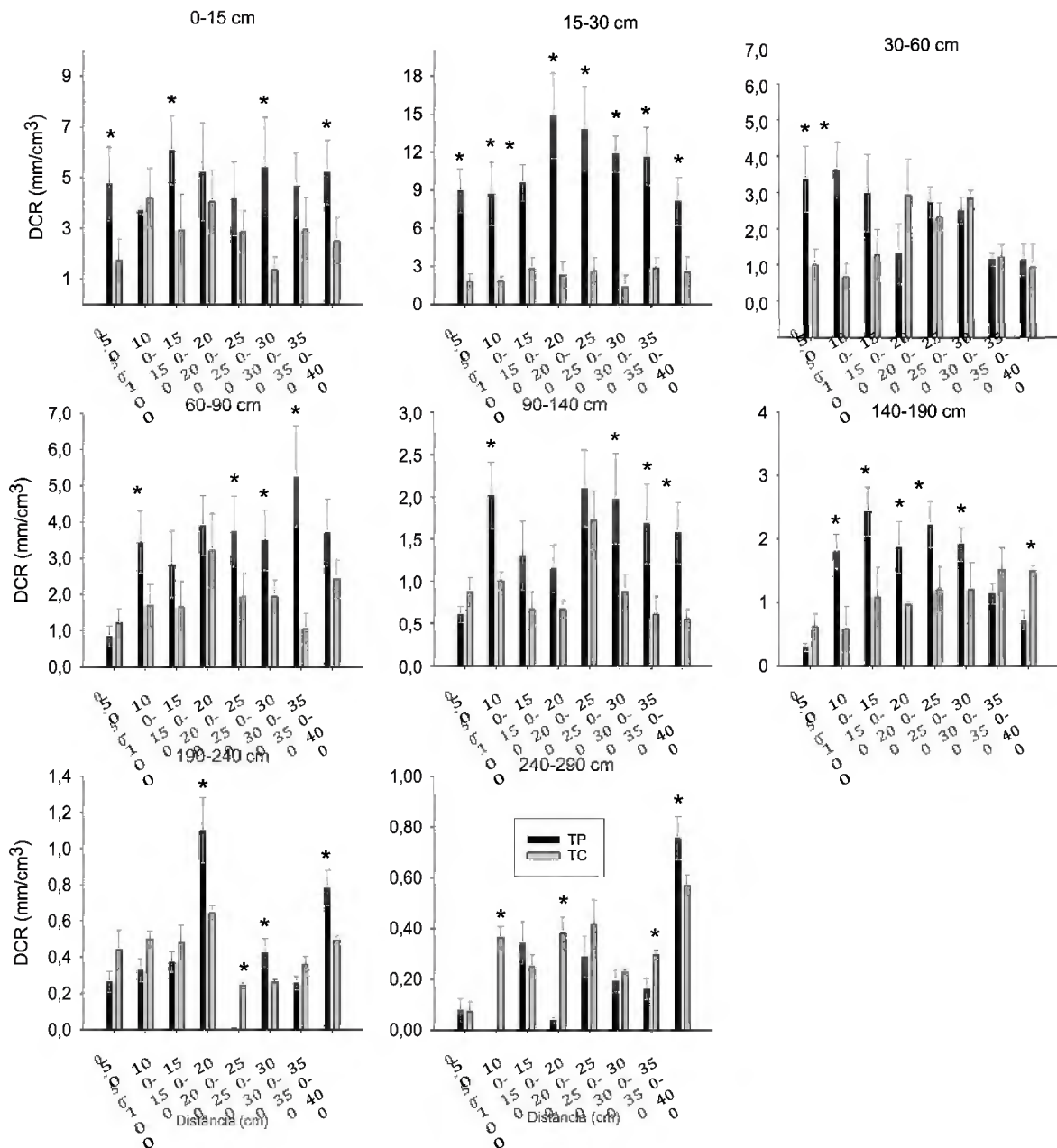


Figura 12 - Densidade de comprimento de raízes quaternárias ( $\Phi$  0,25 - 0,49 mm) em função das distâncias (0-400 cm) comparando trincheira entre plantas (TP) e trincheira entre carreamento (TC). Dados são médias ( $n=4$ ) e asteriscos indicam diferença estatística (tukey a 5%).

Tabela-3: Percentual de densidade de massa de raízes primárias ( $\Phi \geq 5$  mm), secundárias ( $\Phi = 1 - 4,9$  mm), terciárias ( $\Phi = 0,5 - 0,9$  mm) e quaternárias ( $\Phi = 0,25 - 0,49$  mm) em diferentes camadas do solo. Raízes totais são a soma das médias das três classes de raízes. TP – Trincheiras entre plantas, TC – Trincheira entre carreamento, P – Primária, S- Secundária, T- Terciária e Q- Quaternária.

Profundidade (cm)	DMS por Profundidade (%)							
	TP				TC			
	P	S	T	Q	P	S	T	Q
0-15	60,71	29,92	7,25	2,13	60,98	33,94	4,00	1,08
15-30	76,63	18,38	1,90	3,10	81,49	17,48	0,63	0,40
30-60	33,10	51,72	8,73	6,49	32,77	50,38	6,03	5,08
60-90	16,51	46,19	20,53	16,69	25,84	38,52	11,88	14,52
90-140	1,47	73,58	14,47	10,62	1,64	63,29	11,32	6,69
140-190	0,18	81,78	9,70	8,41	0,25	78,32	13,77	8,33
190-240	0,00	76,87	13,67	9,29	0,00	77,30	18,22	12,80
240-290	17,10	75,15	17,03	7,92	0,00	61,69	18,76	9,89

Tabela – 4: Biomassa total da trincheira entre plantas (TP) para cada classe de raiz.

Raiz	TP			
	Massa		Comprimento	
	Kg planta <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>	Km planta <sup>-1</sup>	Km ha <sup>-1</sup>
Primária	35,90	5,13	17,15	2452,45
Secundária	35,97	5,14	137,19	19618,17
Terciária	7,67	1,10	216,08	30899,44
Quaternária	6,09	0,87	317,49	45401,07
Total	85,63	12,25	687,91	98371,13

Tabela – 5: Biomassa total da trincheira entre plantas (TP) para cada classe de raiz.

Raiz	TC			
	Massa		Comprimento	
	Kg planta <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>	Km planta <sup>-1</sup>	Km ha <sup>-1</sup>
Primária	69,36	9,92	33,13	4737,59
Secundária	36,03	5,15	137,43	19652,49
Terciária	5,55	0,79	156,26	22345,18
Quaternária	3,42	0,49	178,31	25498,33
Total	114,37	16,35	505,13	72233,59

Tabela - 6 Resultados de estudos da biomassa de raízes em cultivos de palma de óleo.

Local	Idade (anos)	Profundidade (cm)	massa (Mg/ha)	Fonte
Malásia	4	100	3,00	Jourdan et al. (2000)
Brasil	8	290	14,30	*Este estudo
Brasil	9	600	14,00	Sommer et al. (2000)
Colômbia	10	90	8,60	Cuesta et al., 2010
Malásia	12	90	33,80	Kiyono et al., 2015
Malásia	14	90	9,85	Corley et al., (1971)
Nigéria	17	90	16,40	Rees & Tinker (1963)
Malásia	23	100	16,00	Khalid et al. (1999)
Malásia	27	90	18,59	Corley et al. (1971)

Tabela -7 Biomassa de raízes em diversos sistemas de uso do solo no nordeste do estado do Pará. \*Souza & Gehring, 2010; \*\*Sommer et al., 2000; \*\*\*Este estudo (média de TP e TC).

Sistema	Biomassa de raiz (Mg/ha)	Profundidade (cm)
Culturas sazonais (1 ano)*	1,98	100
Floresta Primária**	22	600
Floresta Secundária (40 anos)**	34	600
vegetação Secundária (12 anos)**	30	600
vegetação Secundária (5 anos)**	23	600
Vegetação Secundária (1 anos)**	12	600
Cultivo Tradicional (15 meses)**	13	600
Cultivo de Maracujá**	3,0	600
Pimenta do reino**	5,0	600
Palma de óleo (8 anos)***	14,30	290

## REFERÊNCIAS

BOARI,A.J.; TEIXEIRA, W.G.; VENTURIERI,A.;MARTORANO,L.; TREMACOLDI, C.R.; CARVALHO,K.B. Avanços nos estudos sobre o amarelecimento fatal da palma de óleo (*Elaeis guinnensis* Jacq.). *Tropical Plant Pathology* 37 (Suplemento), agosto 2012 45º Congresso Brasileiro de Fitopatologia - Manaus,AM disponível em:  
<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/959983/1/BoarietalTropicalPlantPathology3720121.pdf>.

CORLEY, R.H.V., GRAY B.S. & NG S.K. Productivity of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Malaysia. *Expl Agric.*, 7, 1971. p.129–13.

CUESTA, R.R.; PÉREZ, S.B., ROJAS, E.A.P. Root system distribution of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Tumaco, Colombia. *PALMAS*, Volumen 18, No. 3, 1997 p.9.

CUNHA, R. N. V; LOPES, R. BRS Manicoré: Híbrido interespecífico entre Caiaué e o Dendezeiro Africano recomendado para áreas de incidência do amarelecimento fatal. Embrapa: Comunicado Técnico, v. 85, 2010 p. 1-3.

DUFRENE, E. Photosynthèse, consommation en eau et modélisation de la production chez le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.). Thesis, Univ. of Paris-Sud, Orsay. 1989.

FAPESPA – Fundação Amazônia de Amparo a estudos e pesquisas do Pará. Boletim Agropecuário do estado do Pará 2015. 2015. p.21-21. Disponível em :

[http://www.fapespa.pa.gov.br/sites/default/files/Boletim\\_Agropecuario\\_do\\_Esta\\_do\\_do\\_Para\\_2015.pdf](http://www.fapespa.pa.gov.br/sites/default/files/Boletim_Agropecuario_do_Esta_do_do_Para_2015.pdf).

FOLONI, JOSÉ SALVADOR SIMONETI; CALONEGO, JULIANO CARLOS; DE LIMA, SÉRGIO LÁZARO. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v. 38, n. 8, 2003. p. 947-953.

FOLONI JSS, LIMA SL DE, BÜLL LT. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 49–57. Available from: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000100006>

GIBBS, H. K.; JOHNSTON, M.; FOLEY, J. A.; ZAKS, D. Carbon payback times for crop-based biofuel expansion in the tropics: the effects of changing yield and technology. Environmental Research Letters, 2008. p. 3-10,

GLASS, V. Expansão do dendê na Amazônia Brasileira: Elementos para uma análise dos impactos sobre a agricultura familiar no nordeste do Pará. Centro de Monitoramento de Agrocombustíveis. ONG Repórter Brasil, 2013. p.15.

GOMES JUNIOR, R. A. Características vegetativas na fase juvenil de híbridos interespecíficos de caiaué com dendezeiro. Revista de Ciências Agrárias, v. 58, n. 1, 2015. p. 27-35.

HENSON I.E.; CHAI S.H. Analysis of oil palm productivity. II. Biomass, distribution, productivity and turnover of the root system. *Elaeis*, 9, 1997. P. 78–92.

JOURDAN, C.; MICHAUX-FERRIERE N.; PERBAL, G. Root system architecture and gravitropism in the oil palm. *Ann. Bot.*, 85; 2000 p.861–868.

KHALID H, ZIN ZZ, ANDERSON JM. Effect of oil palm residues management at replanting on soil nutrient dynamics and oil palm growth. Proceeding of the PORIM International Palm Oil Congress. Kuala Lumpur: Malaysian Palm Oil Board; 1999.

KIYONO, Y.; MONDA, Y.; TORIYAMA, J.; CHADDY, A.; GOH, K. J.; MELLING, L. Destructive sampling method for estimating the biomasses of African oil palm (*Elaeis guineensis*) plantations on tropical peatland Bulletin of FFPRI Vol.14 No.3, 2015. p.147 – 158.

LAMADE, E.; SETIYO, I.E. Test of Dufrêne's production model on two contrasting families of oil palm in North Sumatra. In: Proc. 1996 PORIM Int. Palm Oil Congr. 'Competitiveness for the 21st century' (Ed. by D. Ariffin et al.), 1996. pp. 427–435,.

LOPES, R.; CUNHA, R. N. V.; RESENDE, M. D. V. Produção de cachos e parâmetros genéticos de híbridos de caiaué com dendezeiro. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 47, n. 10, 2012 p. 1496-1503. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012001000012>.

MACIEL, J.B. Teor, Partição e Exportação de Macronutrientes em Cacho de Fruto Fresco de Híbrido Interespecífico de Palma de Óleo. Universidade Federal Rural da Amazônia. Dissertação, Belém 2018.

MEDEIROS, J. S.; SANO, E. Análise multitemporal de imagens digitais do Landsat TM na detecção de áreas afetadas por ataques de lagartas (Sibine fusca) na cultura de dende (Elaeis guineensis). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5. Natal. Anais. São José dos Campos, INPE, 1988.

Passioura, JB. Soil structure and plant growth. Australian Journal of Soil Research. 1991. 29. DOI.10.1071/SR9910717

REES, A.R.; TINKER, P.B. Dry-matter production and nutrient content of plantation oil palms in Nigeria. I. Growth and dry-matter production. Pl. Soil, 19, 1963. 19–32.

SANTOS, R.S.S; ROCHA, V.K.G; SILVA, M.P; CARDOSO, P.N; O Híbrido interespecífico entre o dendezeiro e o Caiaué como agente de sustentabilidade da cadeia produtiva. IV Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais na Amazônia . Belém-PA. 18 a 20/11. 2015.

SOMMER, R.; DENICH, M.; and VLEK P.L.G.; Carbon storage and root penetration in deep soils under small-farmer land-use systems in the Eastern Amazon region, Brazil Plant and Soil 219, 2000. p.231–241.

TAILLIEZ, B. The root system of the oil palm on the San Alberto plantation in Colombia. *Oléagineux*, 26, 1971 p.435 – 448.

TAN, K.S.; RAO A.N. Certain aspects of developmental morphology and anatomy of oil palm. In: *Histochemistry, developmental and structural anatomy of Angiosperms: a symposium*, 1979. p. 267–285.

VENTURIERI , A.; FERNANDES, W. R., BOARI, A. J.; VASCONCELOS, M. A.. Relação entre ocorrência do amarelecimento fatal do Dendezeiro (*Elaeis guineensis* jacq.) E variáveis ambientais no estado do Pará. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, 25-30 abril, INPE, 2009 p. 523-530.

YAHYA ,Z.; HUSIN , A.; TALIB, J.; OTHMAN, J.; AHMED ,O, H. ; JALLOH, M. B. Oil Palm (*Elaeis guineensis*) Roots Response to Mechanization in Bernam Series Soil. *American Journal of Applied Sciences* 7 (3): 2010 p.343-348.

YAHYA ,Z.; HANIFF M. H.; ZULKIFLI H. Oil Palm Roots Adaptation Under Soil Compacted By Mechanization. *International Journal of Agricultural Science and Research (IJASR)* Vol. 5, 2015. p.331-342.