ISSN 2764-3808
V. 25, Nº 47 | DEZEMBRO 2022

SÉRIE TÉCNICA IPEF

Duas décadas de cooperação científica CIRAD-ESALQ-IPEF

Anais de comemoração

Contribuição para a compreensão do funcionamento das plantações florestais tropicais de rápido crescimento

Jean-Paul Laclau
José Leonardo de Moraes Gonçalves
José Otávio Brito

IPEF
INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS

IPEF_SERIE_TECNICA_v25n47.indb 1 04/05/2023 17:18:49

Série Técnica IPEF
n. 47, p. 14-19, Dezembro de 2022

Capítulo 3
Raízes profundas em plantações de eucalipto

Robin, A., Bordron, B., Bouillet, J.-P., Christina, M., Lambais, G. R., Pradier, C., Germon, A., Pinheiro, R.I.C., Gonçalves, J.L.M., Guerrini, I.A., Laclau, J.-P., Jourdan, C.

INTRODUÇÃO

Um dos principais fatores limitantes ao crescimento das árvores em regiões tropicais é a deficiência nutricional em nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). A maioria dos nutrientes disponíveis está localizada na camada superior do solo nas plantações florestais, mas em solos altamente intemperizados e profundos (Laclau et al., 2010). Apesar disso, verifica-se que há nos horizontes profundos uma quantidade de nutrientes (K e Ca notadamente) que não pode ser desprezada (da Silva et al., 2011; Laclau et al., 2010). O estudo das raízes finas é uma maneira inovadora para compreendermos os processos desenvolvidos pelas árvores na busca de recursos. As raízes finas são tradicionalemente definidas como raízes não lenhosas com diâmetro ≤ 2 mm, elas diferem em forma e função, e desempenham um papel fundamental na ciclagem de água, nutrientes e carbono (Germon et al., 2020; McCormack et al., 2015; Pregitzer et al., 2002). A maioria das raizes de eucalipto no Brasil estão localizadas abaixo de um metro de profundidade (Laclau et al., 2013), por isso durante muito tempo, pouco se sabia sobre a importância das raízes profundas no funcionamento e crescimento das plantas. Nos quinze últimos anos, pesquisas inovadoras foram realizadas na estação experimental de Itatinga que permitem de o papel das raízes profundas no funcionamento das plantações de eucalipto.

MÉTODOS DE CAMPO PARA ESTUDAR AS RAÍZES FINAS EM PROFUNDIDADE

Técnicas de escavação e coletas sequenciais de solo ainda são os métodos mais usados (Figura 1A). Embora comumente usado, as escavações e abertura de trincheiras são limitadas ao primeiro metro e dificilmente podem chegar à mais de dois metros deprofundidades. Além disso, trados mecânicos foram desenvolvidos para facilitar o amostrados das camadas mais profundas do solo (Figura 1B). Por exemplo Germon et al. (2019) colhetaram amostras até 17 m de profundidade chegando ao nível do lençol freático. A amostragem volumétrica de raízes de árvores através de métodos de coleta com sonda usando os polígonos de voronoi (Razakamanarivo et al., 2012; Saint-André et al., 2005) é uma opção mais eficiente para o mapeamento de distribuição de raízes finas, em comparação com a abertura de trincheiras levando em consideração à distribuição heterogênea das raízes no solo. As diversas metodologias têm sido empregadas para quantificar a biomassa e a dinâmica de crescimento em profundidade das raízes finas das plantações de eucalipto (Christina et al., 2011; da Silva et al., 2011; Germon et al., 2018; Lambais et al., 2017; Germon et al., 2019; Bordron et al., 2021), sendo que grande parte desses estudos utilizam métodos destrutivos para obtenção dos resultados. Métodos não destrutivos diretos para estudar sistemas de raízes como MiniRizotrons (MR) e "janelas de raízes" têm a vantagem de permitir a observação repetida de locais específicos no perfil do solo que foi utilizado em trincheiras de concreto permanentes (Figura 1C). Além disso existe também métodos indiredos como o uso marcadores que são utilizados para estimar a capacidade potencial de absorção das raízes em diferentes profundidades do solo (da Silva et al., 2011; Bordron et al., 2019; Pinheiro et al 2019) (Figura 1D).

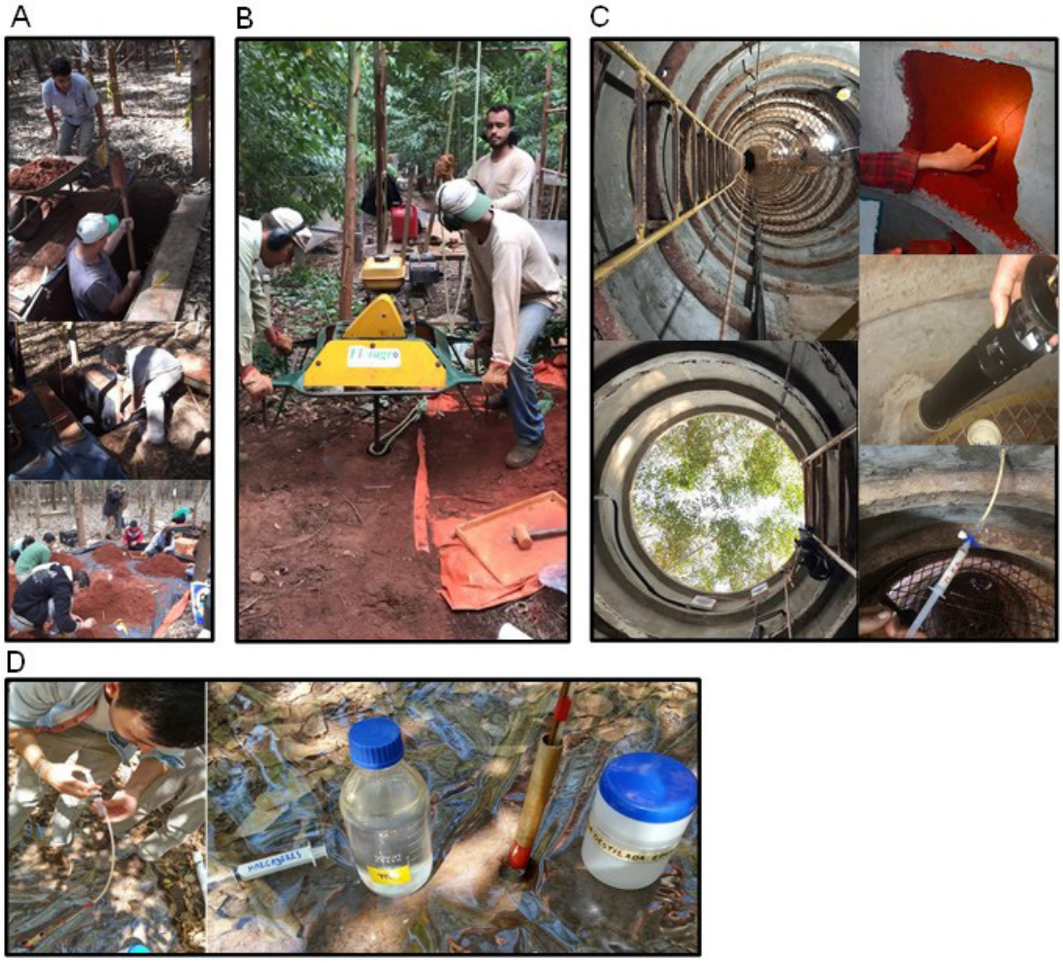

Figura 1. Ilustrações de diferentes métodos de campo para estudar raízes profundas. (A) Abertura de trincheiras, (B) trado mecanizado, (C) trincheiras de concreto até 17 m de profundidade com janelas de observações, instalação de tubos de MiniRizotrons e de seringas para coletar gases (CO_2, N_2O e CH_4), (D) applicações de marcadores ($NO_3^{-15}N$, Rb^+ , Sr^{2+}) à diferentes profondidas no solo.

RAÍZES FINAS EM PROFUNDIDADE

Raízes finas profundas são definidas como raízes que crescem abaixo de 1 metro e que podem fornecer acesso à água e nutrientes onde as raízes das camadas superiores não conseguem alcançar. No Brasil, mais de 50% das plantações de eucalipto estão localizadas solos tropicais são solos altamente intemperizados, com alto grau de lixiviação e baixa fertilidade natural (Gonçalves et al., 2013). Esse tipo de solo são profundos, sem camada de impedimento facilitando assim os estudos sobre o crescimento radicular nos horizontes mais profundos (Christina et al., 2011; Laclau et al., 2013). Nas plantações de eucalipto no Brasil foram encontradas cerca de 60% das raízes muito finas (< 1 mm de diâmetro) abaixo de 1 m de profundidade a partir de um ano de idade e até o final da rotação (Laclau et al., 2013). As árvores de eucalipto exploram rapidamente as camadas de solo mais profundas (Christina et al., 2011;). Estudos mostraram a existência de raízes finas até 13 m de profundidade aos 2 anos (Pinheiro et al., 2016) e a 17 m de profundidade (nível do lençol freático) aos 3,5 anos de idade (Christina et al., 2011). Christinas et al. (2011) mostrou que a altura das árvores e as taxas de crescimento da frente da raiz evoluem de forma muito simétrica (Figura 2).

IPEF_SERIE_TECNICA_v25n47.indb 15 04/05/2023 17:19:02

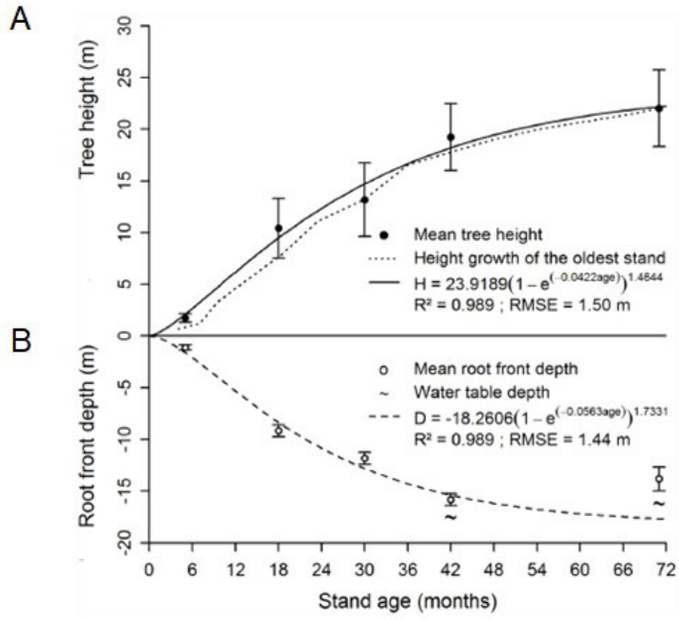

Figura 2. Crescimento da árvore em altura (A) e em profundidade (B) ao longo de uma rotação completa de eucalipto (6 anos), Christinas et al. (2011).

A exploração das raízes finas durante os primeiros meses após o plantio dos horizontes profondos do solo pode fornecer uma vantagem competitiva para espécies de crescimento rápido em florestas estabelecidas em solos profundos. Uma diminuição daprecipitação anual aumenta a profundidade média de retirada de água do solo, diminui o teor de água residual do solo em camadas profundas do solo e leva a uma queda do nível dolençol freático (Guillemot et al., 2021). O impacto negativo da diminuição da precipitação anual sobre os recursos hídricos do solo foi menor nas parcelas com árvores deficientes em K do que nas parcelas fertilizadas com K. As raízes finas impedem as perdas de nutrientes por drenagem (Laclau et al., 2010), sendo assim, importantes para a absorção de nutrientes (da Silva et al., 2011; Bordron et al., 2019 ; Pinheiro et al 2019). As raízes finas profundas também melhoram a tolerância das árvores à seca e armazenam C em camadas de solo profundas (Laclau et al., 2013). Pinheiro et al. (2016) cita a importância para programas de melhoramento genético na eucaliptocultura, e o considera estratégico para explicar diferentes taxas de sobrevivência de clones em períodos secos. Clones com um desenvolvimento radicular mais profundo passam a ter acesso a uma reserva de água maior no solo quando comparados a clones com desenvolvimento radicular mais superficial.

ABSORÇÃO DE NUTRIENTES DAS RAÍZES FINAS EM PROFUNDIDADE

Uma forma de verificar a capacidade de absorção das raízes finas em diferentes profundidades do solo é por meio da técnica de marcadores, aplicando isótopos estáveis ou elementos análogos em diferentes profundidades. Após um período é recolhido folhas jovens recentemente expandidas das árvores para verificar como ocorreu a absorção em cada profundidade marcada (da Silva et al., 2011). Alguns fatores devem ser considerados para a aplicação dos marcadores: 1) os marcadores devem estar bem diluídos e sua aplicação deve ser uniforme; 2) a quantidade disponível de raízes marcadas deve ser previsível com relação a processos concorrentes, como imobilização microbiana e adsorção do solo; e 3) é necessário um breve conhecimento da capacidade de absorção do marcador por raízes em

IPEF_SERIE_TECNICA_v25n47.indb 16 04/05/2023 17:19:03

comparação com outro nutriente do solo (Maeght et al., 2013). Estudos recentes apontam que a especialização das raízes finas de *Eucalyptus grandis* na captação de nutrientes pode ocorrer em camadas superficiais e profundas. Da Silva et al. (2011) estudando raízes finas de eucalipto em plantações joven em diferentes profundidades e utilizando marcadores de ^{15}N, Sr^{2+} (análago do Ca^{2+}) e Rb^{+} (análogo do K^{+}) mostraram que há uma especialização funcional das raízes finas, e que elas aumentam a eficiência de captação de Ca e K em camadas profundas em relação à camada superficial de solo. Assim como as árvores adultas, as raízes finas de árvores jovens de *E. grandis* mostram taxas de absorção potencial contrastantes com profundidade dependendo do nutriente o que é reforçado pela aplicaçãode fertilizantes que permitiram uma maior absorção de potássio e cálcio por unidade de comprimento de raiz nas camadas profundas do solo em comparaçao com árvores não fertilizadas (Bordron et al., 2019). Esses resultados sugerem que a especialização funcional das raízes finas para a absorção de nutrientes é uma característica estável do eucalipto que pode ser reforçada pela aplicação de fertilizantes (Bordron et al., 2019). Grandes diferenças na densidade de ramificação de raízes muito finas e associação com simbioses micorrízicas podem desempenhar um papel importante na absorção profunda de nutrientes (Figura 3). Robin et al. (2019) demonstraram pela primeira vez usando sequenciamento molecular que simbioses ectomicorrizais ocorreram com raízes de *Eucalyptus grandis* a uma profundidade de 4 m o que pode ter consequências na absorção de nutrientes pelas raízes profundas.

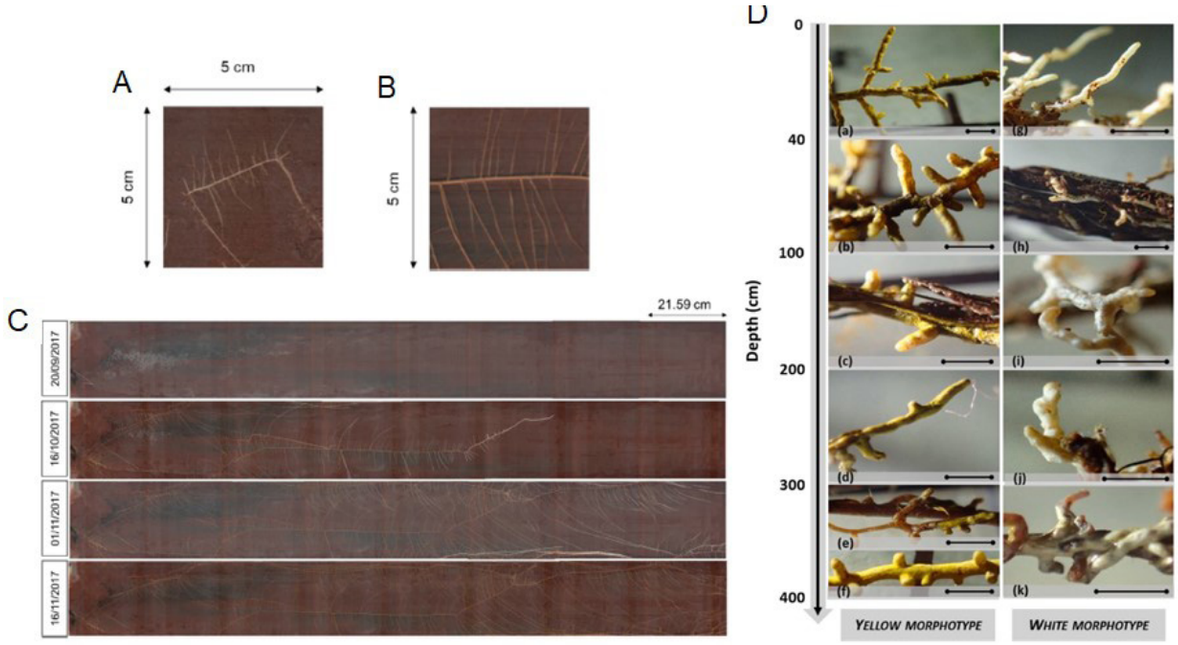

Figura 3. Imagens de raízes finas de eucalipto no solo superficial (A) e à 11,5 m de profundidade (B) em tubos de miniRizotron instalados em trincheiras profundas permanentes no Brasil. As imagens mostram grandes diferenças na densidade de ramificação das raízes muito finas (< 1 mm de diâmetro). A velocidade de exploração das camadas profundas do solo neste estande é mostrada escaneando o mesmo tubo minirizotron de 1,8 m de comprimento inserido a 11,5 m de profundidade de 20 de setembro de 2017 à 16 de novembro de 2017 (C). Adaptado de Germon et al. (2020). Photos de raízes com ectomicorrízicas amostradas até 4 metros de profundidade em uma plantação de *Eucalyptus grandis* no Brasil (D). O morfotipo amarelo (a–f) foi identificado molecularmente como *Pisolithus* spp. e o morfotipo branco (g–k) como *Scleroderma* spp. Adaptado de Robin et al. (2019).

IPEF_SERIE_TECNICA_v25n47.indb 17 04/05/2023 17:19:03

CONCLUSÃO

Atualmente, as informações sobre a importância de raízes profundas no funcionamento da planta e dos ecossistemas, através dos ciclos hidrológicos e bioquímicos, continuam escassas em comparação com a parte aérea da planta. Essa situação parece estar relacionada a dois fatores principais: i) limitações tecnológicas e econômicas, para coletar e analisar medir raízes com rendimento suficiente; ii) a suposição difundida que as raízes representam uma parte marginal das plantas. Apesar das raízes profundas representarem uma fração relativamente pequena do total da biomassa do sistema radicular, as pesquisas desenvolvidas no Brasil mostram as raizes finas profondas possuiem um papel muito mais importante do que tem sido sido descritas. Estudos recentes indicam claramente que "um olhar mais profundo" é essencial para aumentar nosso entendimento da ecofisiologia da planta, bem como da ecologia das comunidades e dos ciclos biogeoquímicos. Assim, as raízes profundas são de primeira importância para melhorar o manejo das plantações florestais de eucalipto e, principalmente, na questão da resistência ao estresse seca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bordron, B., Germon, A., Laclau, J.P., Oliveira, I.R., Robin, A., Jourdan, C., Paula, R.R., Pinheiro, R.C., Guillemot, J., Gonçalves, J.L.M., Bouillet, J.P., 2021. Nutrient supply modulates species interactions belowground: dynamics and traits of fine roots in mixed plantations of Eucalyptus and Acacia mangium. Plant Soil 460, 559–577. https://doi.org/10.1007/s11104-020-04755-2

Bordron, B., Robin, A., Oliveira, I.R., Guillemot, J., Laclau, J.P., Jourdan, C., Nouvellon, Y., Abreu-Junior, C.H., Trivelin, P.C.O., Gonçalves, J.L.M., Plassard, C., Bouillet, J.P., 2019. Fertilization increases the functional specialization of fine roots in deep soil layers for young Eucalyptus grandis trees. For. Ecol. Manage. 431, 6–16. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.018

Christina, M., Laclau, J. P., Goncalves, J. L. M., Jourdan, C., Nouvellon, Y., and Bouillet, J. P. (2011). Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forests. Ecosphere 2, 1-10.

da Silva, E. V., Bouillet, J. P., Goncalves, J. L. D., Abreu, C. H., Trivelin, P. C. O., Hinsinger, P., Jourdan, C., Nouvellon, Y., Stape, J. L., and Laclau, J. P. (2011). Functional specialization of Eucalyptus fine roots: contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracers at varying soil depths. Functional Ecology 25, 996-1006.

Germon, A., Guerrini, I. A., Bordron, B., Bouillet, J. P., Nouvellon, Y., Goncalves, J. L. D., Jourdan, C., Paula, R. R., and Laclau, J. P. (2018). Consequences of mixing Acacia mangium and Eucalyptus grandis trees on soil exploration by fine-roots down to a depth of 17 m. Plant and Soil 424, 203-220.

Germon, A., Jourdan, C., Bordron, B., Robin, A., Nouvellon, Y., Chapuis-Lardy, L., Goncalves, J. L. D., Pradier, C., Guerrini, I. A., and Laclau, J. P. (2019). Consequences of clear-cutting and drought on fine root dynamics down to 17 m in coppice-managed eucalypt plantations. Forest Ecology and Management 445, 48-59.

Germon, A., Laclau, J. P., Robin, A., and Jourdan, C. (2020). Tamm Review: Deep fine roots in forest ecosystems: Why dig deeper? Forest Ecology and Management 466, 118135.

Guillemot, J., Asensio, V., Bordron, B., Nouvellon, Y., le Maire, G., Bouillet, J. P., Domec, J. C., Rojas, J. S. D., Abreu, C. H., Battie-Laclau, P., Cornut, I., Germon, A., Goncalves, J. L. D., Robin, A., and Laclau, J. P. (2021). Increased hydraulic constraints in Eucalyptus plantations fertilized with potassium. Plant Cell and Environment 44, 2938-2950.

Gonçalves, J.L.D.M., Alvares, C.A., Higa, A.R., Silva, L.D., Alfenas, A.C., Stahl, J., Ferraz, S.F.D.B., Lima, W.D.P., Brancalion, P.H.S., Hubner, A., Bouillet, J.P.D., Laclau, J.P., Nouvellon, Y., Epron, D., 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. For. Ecol. Manage. 301, 6–27. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030

Laclau, J.-P., da Silva, E. A., Lambais, G. R., Bernoux, M., le Maire, G., Stape, J. L., Bouillet, J.-P., de Moraes Goncalves, J. L., Jourdan, C., and Nouvellon, Y. (2013). Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in Eucalyptus grandis plantations. Frontiers in Plant Science 4.

Laclau, J. P., Ranger, J., Goncalves, J. L. D., Maquere, V., Krusche, A. V., M'Bou, A. T., Nouvellon, Y., Saint-Andre, L., Bouillet, J. P., Piccolo, M. D., and Deleporte, P. (2010). Biogeochemical cycles of nutrients in tropical eucalyptus plantations main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. Forest Ecology and Management 259, 1771-1785.

Lambais, G. R., Jourdan, C., Piccolo, M. D., Germon, A., Pinheiro, R. C., Nouvellon, Y., Stape, J. L., Campoe, O. C., Robin, A., Bouillet, J. P., le Maire, G., and Laclau, J. P. (2017). Contrasting phenology of Eucalyptus grandis fine roots in upper and very deep soil layers in Brazil. Plant and Soil 421, 301-318.

IPEF_SERIE_TECNICA_v25n47.indb 18 04/05/2023 17:19:03

Maeght, J.-L., Rewald, B., Pierret, A., 2013. How to study deep roots-and why it matters. Front. Plant Sci. 4, 1–14. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00299

McCormack, M. L., Dickie, I. A., Eissenstat, D. M., Fahey, T. J., Fernandez, C. W., Guo, D., Helmisaari, H.-S., Hobbie, E. A., Iversen, C. M., Jackson, R. B., Leppalammi-Kujansuu, J., Norby, R. J., Phillips, R. P., Pregitzer, K. S., Pritchard, S. G., Rewald, B., and Zadworny, M. (2015). Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. New Phytologist 207, 505-518.

Pinheiro, R. C., de Deus, J. C., Nouvellon, Y., Campoe, O. C., Stape, J. L., Alo, L. L., Guerrini, I. A., Jourdan, C., and Laclau, J. P. (2016). A fast exploration of very deep soil layers by Eucalyptus seedlings and clones in Brazil. Forest Ecology and Management 366, 143-152.

Pinheiro, R.C., Bouillet, J.-P., Bordron, B., Aló, L.L., Costa, V.E., Alvares, C.A., Meersche, K. Van den, Stape, J.L., Guerrini, I.A., Laclau, J.-P., 2019. Distance from the trunk and depth of uptake of labelled nitrate for dominant and suppressed trees in Brazilian Eucalyptus plantations: Consequences for fertilization practices. For. Ecol. Manage. 447, 95–104. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.011

Pregitzer, K.S., DeForest, J.L., Burton, A.J., Allen, M.F., Ruess, R.W., Hendrick, R.L., 2002. Fine root architecture of nine North American trees. Ecol. Monogr. 72, 293–309. https://doi.org/10.2307/3100029

Razakamanarivo, R.H., Razakavololona, A., Razafindrakoto, M.A., Vieilledent, G., Albrecht, A., 2012. Below-ground biomass production and allometric relationships of eucalyptus coppice plantation in the central highlands of Madagascar. Biomass and Bioenergy 45, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.020

Robin, A., Pradier, C., Sanguin, H., Mahé, F., Lambais, R. G., Pereira, A. P. A., Germon, A., Santana, M. C., Heuillard, P., Sauvadet, M., Bouillet, J. P., Andreote, F. D., Plassard, P., Gonçalves, J. L. M., Cardoso, E. J. B. N., Laclau, J. P., Hinsinger, P., and Jourdan, C. (2019). How deep can ectomycorrhizas go? A case study on Pisolithus down to 4 meters in a Brazilian eucalypt plantation. Mycorrhiza 29, 637-648.

Saint-André, L., M'Bou, A.T., Mabiala, A., Mouvondy, W., Jourdan, C., Roupsard, O., Deleporte, P., Hamel, O., Nouvellon, Y., 2005. Age-related equations for above- and below-ground biomass of a Eucalyptus hybrid in Congo. For. Ecol. Manage. 205, 199–214. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.006

IPEF_SERIE_TECNICA_v25n47.indb 19 04/05/2023 17:19:03