

Importância ecossistêmica das raízes: Uma revisão de literatura

Ecosystem importance of roots: A literature review

Importancia ecosistémica de las raíces: Una revisión de la literatura

Recebido: 22/02/2024 | Revisado: 29/02/2024 | Aceitado: 03/03/2024 | Publicado: 04/03/2024

Jéssica Araújo Heringer Ribeiro

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6216-1632>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: jessica.heringer@outlook.com

Lígia Haira Duarte de Almeida

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1335-4311>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: ligiahaira19@gmail.com

Thaís Gonzaga de Souza

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9174-0499>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: gonzagathaisufra@gmail.com

Pamella Leandra Silva Lima

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7445-1821>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: pamellaleandra97@yahoo.com

Sara de Sousa Cardoso

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3048-9765>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: sarasousacardoso791@gmail.com

Paulo Henrique Pereira de Souza

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5229-3453>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: pprick13@gmail.com

Fernando da Costa Brito Lacerda

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9801-3680>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: fernando.lacerda@ufra.edu.br

Resumo

As raízes finas são todas aquelas com diâmetro ≤ 2 mm. Essas raízes são responsáveis por uma porção significativa da produtividade primária dos ecossistemas terrestres, sendo importantes para o fornecimento de recursos para a comunidade microbiana do solo e por influenciarem na ciclagem de carbono e nutrientes. Apesar da sua reconhecida importância, as raízes finas são comumente negligenciadas em estudos de biomassa vegetal. Os estudos de biomassa radicular são generalizadamente limitados em todo o mundo, principalmente em virtude da complexidade metodológica envolvida nos processos analíticos. O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão dos estudos sobre a temática de raízes, abordando o desenvolvimento de tecnologias no processo analítico e importância desse componente dinâmico de biomassa nos processos ecossistêmicos relacionados a ciclagem de carbono e nutrientes do solo. Ressaltamos aqui a importância e necessidade de novas pesquisas científicas que busquem desenvolver métodos de análise, bem como estimar a produtividade primária subterrânea, sobretudo a de raízes finas, para que os processos envolvidos na ciclagem de carbono e nutrientes sejam mais bem elucidados.

Palavras-chave: Biomassa radicular; Ecossistemas; Carbono; Nutrientes.

Abstract

Fine roots are all those with a diameter ≤ 2 mm. These roots are responsible for a significant portion of the primary productivity of terrestrial ecosystems, being important for providing resources to the soil microbial community and for influencing the cycling of carbon and nutrients. Despite their recognized importance, fine roots are commonly neglected in plant biomass studies. Root biomass studies are generally limited throughout the world, mainly due to the methodological complexity involved in the analytical processes. The objective of this work was to carry out a review of studies on the topic of roots, addressing the development of technologies in the analytical process and the importance of this dynamic biomass component in ecosystem processes related to carbon cycling and soil nutrients. We emphasize here the importance and need for new scientific research that seeks to develop methods of analysis, as well as to estimate the underground primary productivity, especially that of fine roots, so that the processes involved in the cycling of carbon and nutrients are better elucidated.

Keywords: Root biomass; Ecosystems; Carbon; Nutrients.

Resumen

Las raíces finas son todas aquellas con un diámetro ≤ 2 mm. Estas raíces son responsables de una parte importante de la productividad primaria de los ecosistemas terrestres, siendo importantes para proporcionar recursos a la comunidad microbiana del suelo e influir en el ciclo del carbono y los nutrientes. A pesar de su reconocida importancia, las raíces finas comúnmente se pasan por alto en los estudios de biomasa vegetal. Los estudios de biomasa de raíces son generalmente limitados en todo el mundo, principalmente debido a la complejidad metodológica involucrada en los procesos analíticos. El objetivo de este trabajo fue realizar una revisión de estudios sobre el tema de raíces, abordando el desarrollo de tecnologías en el proceso analítico y la importancia de este componente dinámico de la biomasa en los procesos ecosistémicos relacionados con el ciclo del carbono y los nutrientes del suelo. Resaltamos aquí la importancia y necesidad de nuevas investigaciones científicas que busquen desarrollar métodos de análisis, así como estimar la productividad primaria subterránea, especialmente la de raíces finas, de modo que se puedan dilucidar mejor los procesos involucrados en el ciclo del carbono y los nutrientes.

Palabras clave: Biomasa de raíces; Ecosistemas; Carbón; Nutrientes.

1. Introdução

As raízes são estruturas essenciais às plantas e surgiram durante o processo de colonização do ambiente terrestre (Oliveira, 2017; Raven & Eichhorn, 2014). Desempenham diversas funções, dentre elas o ancoramento e a sustentação, absorção de água e nutrientes, e a produção de hormônios reguladores de crescimento (Valverde-Barrantes et al., 2015). Além disso, as raízes são responsáveis por uma porção significativa da produtividade primária dos ecossistemas terrestres (Mommer et al., 2015; Ma & Chen, 2016; Freschet et al., 2021), sendo importantes para o fornecimento de recursos para a comunidade microbiana do solo e influenciando, portanto, nos processos de decomposição microbiana e na ciclagem de nutrientes (Freschet & Roumet, 2017; Wang et al., 2019). Por contribuírem com a melhoria dos aspectos físicos e químicos do solo, as raízes são consideradas como um bom indicador da qualidade dos solos (Garlet & Schumacher, 2020).

O desenvolvimento radicular é um processo complexo, controlado por características inerentes à própria planta e ao ambiente no qual ela se encontra inserida (Valverde-Barrantes et al., 2015). Segundo Abramoff e Finzi (2015), um dos principais fatores que controlam a abundância e distribuição das raízes no solo é o genótipo das espécies que compõem a comunidade vegetal, entretanto as propriedades físicas e químicas do solo, tais como fertilidade, densidade, disponibilidade de oxigênio, pH, textura e temperatura, bem como a sazonalidade climática, também exercem forte influência (Valverde-Barrantes et al., 2015).

Cabe ressaltar que as interações ecológicas entre as plantas também influenciam o desenvolvimento radicular (Erktan; McCormack & Roumet, 2018). Nesse sentido, estudos já demonstraram que a densidade e a diversidade de plantas podem interferir na biomassa radicular, em virtude principalmente das relações de competição ou facilitação que são estabelecidas (Garlet & Schumacher, 2020; Zeng et al., 2021). Assim, a dinâmica de crescimento radicular se relaciona diretamente às variações edáficas, climáticas e vegetativas.

Comumente, as raízes são categorizadas de acordo com o tamanho do diâmetro (\emptyset), sendo divididas basicamente nas frações grossa e fina, ambas com funções diferenciadas (Ratuchne et al., 2016). Apesar de algumas variações na literatura quanto à metodologia de classificação, existe o consenso de que uma raiz fina é aquela com um diâmetro < 2 ou < 5 mm, acima disso a raiz já é considerada grossa (Finér et al., 2011; Navroski et al., 2010; Morais et al., 2017; Freschet et al., 2021). Em todo caso, em trabalhos mais recentes é frequente o uso da definição de que as raízes finas são todas aquelas ≤ 2 mm (Garlet & Schumacher, 2020; Kulmann et al., 2022). As raízes finas geralmente se distribuem no perfil do solo na parte mais superficial, devido a maior aeração e aos elevados níveis de matéria orgânica e nutrientes nas primeiras camadas do solo (Kulmann et al., 2022).

Os tecidos externos permeáveis e com baixo grau de suberização que compõe as raízes finas desempenham função essencial na absorção de água e nutrientes. Por outro lado, as raízes grossas atuam no suporte, condução de solutos, expansão do sistema de modo geral e fixação da planta no solo, sendo assim, crescem mais em profundidade (Ratuchne et al., 2016).

Autores como Correa et al. (2019) indicam que a qualidade do sistema radicular pode ser mensurada considerando a amplitude da superfície de contato do sistema com o solo, pois quanto mais profundo, maior o volume de solo explorado pela planta.

Apesar da sua reconhecida importância, as raízes finas ainda são pouco estudadas, principalmente em virtude da complexidade metodológica envolvida nos processos analíticos (Ratuchne et al., 2016). Segundo Ma e Chen (2016), estudos mais detalhados sobre o sistema radicular das plantas são comumente mais trabalhosos do que os realizados na parte aérea e isso parece ser preponderante para a reduzida quantidade de trabalhos científicos sobre esse tema. Sainju e Good (1993) já indicavam um atraso nas pesquisas científicas sobre o sistema radicular; e apesar do número de trabalhos terem aumentado significativamente nas últimas décadas, ainda são muito limitados quando consideramos a diversidade dos ecossistemas terrestres existentes.

Em geral, as metodologias utilizadas para avaliar a produtividade de raízes são onerosas e intensivas, podendo gerar perturbações no ambiente durante a coleta de amostras, e estão sujeitas a uma grande variedade de protocolos de avaliação que incluem métodos destrutivos e/ou indiretos, o que dificulta a difusão de métodos mais eficientes e replicáveis (Addo-Danso et al., 2016; Ma & Chen, 2016). Diante disso, o objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão dos estudos sobre a temática de raízes, abordando o desenvolvimento de tecnologias no processo analítico e a importância desse componente dinâmico de biomassa nos processos ecossistêmicos relacionados a ciclagem de carbono e nutrientes do solo.

2. Metodologia

Este estudo consiste em uma revisão narrativa (Rother, 2007) sobre a importância ecossistêmica das raízes, bem como de metodologias de coleta e análise de dados. Assim, essa temática foi discutida aqui de forma conceitual e teórica, trazendo perspectivas do “estado da arte” além de proposições do desenvolvimento de novas técnicas metodológicas para pesquisas nessa área. A busca dos artigos científicos utilizados foi realizada na base de dados do Google acadêmico e no portal de periódicos CAPES (www.periodicos.capes.gov.br). As palavras-chave utilizadas para a busca foram Raízes finas, Biomassa radicular, Produtividade radicular, Ciclagem de nutrientes, Ciclagem de Carbono, Serviços ecossistêmicos. Foram considerados artigos em português e inglês dentro da temática proposta e que apresentavam domínio público.

3. Resultados e Discussão

3.1 Influência da produtividade radicular no ciclo do Carbono

O ciclo global do carbono (C) é controlado basicamente pelo balanço entre a emissão e a absorção de CO₂ pelos ecossistemas terrestres (Pereira Júnior et al., 2016; Morandi et al., 2021). A vegetação desempenha um papel fundamental na regulação desse ciclo, visto que a partir do processo fotossintético, uma parcela significativa de CO₂ é absorvida e posteriormente estocada na biomassa vegetal (Aguiar, 2018). Nesse sentido, sabe-se que de acordo com o ecossistema, as raízes podem ser responsáveis por até mais de 50% da produtividade primária (Ma & Chen, 2016; Freschet et al., 2021), superando a parte aérea em acúmulo de biomassa.

O *turnover* dessa biomassa vegetal é um dos principais caminhos para incorporação de C no solo. Isso é particularmente importante, visto que a matéria orgânica do solo pode representar grande parte do carbono total nos ecossistemas terrestres (Nanzer et al., 2019). Assim, além de serem eficientes para a fixação carbônea, as raízes, principalmente as finas (por serem altamente dinâmicas), impactam diretamente o ciclo biogeoquímico do C (Ratuchne et al., 2016).

Cabe salientar que a maioria dos estudos de biomassa nos ecossistemas terrestres se concentrou apenas no componente acima do solo, enquanto os reservatórios subterrâneos, como a biomassa radicular, ainda são bastante negligenciados (Pereira Júnior et al., 2016). A não incorporação desses estoques subterrâneos reduz a precisão das estimativas, impedindo uma melhor

compreensão sobre a real contribuição dos diferentes ecossistemas terrestres no balanço global de carbono. Para exemplificar isso, Albrigo (2021) verificou que em uma floresta primária na Amazônia Ocidental, a quantidade de C estocada na biomassa radicular foi de 5,24 Mg ha⁻¹. Silver et al. (2000) verificaram que em média, a biomassa de raízes finas e grossas comportam respectivamente 1/4 e 1/3 do carbono total em solos florestais da Amazônia. Jackson et al. (1997) verificaram que em florestas temperadas as raízes finas contribuíram com até 67 % da produção primária líquida anual. Fialho (2016) verificou que em plantios de eucalipto, as raízes finas representaram cerca de 17 % do C total do solo, estocando aproximadamente 0,34 C t ha⁻¹ ano. Por fim, Ramos et al. (2018) verificaram que em sistemas agroflorestais a biomassa de raízes finas foi de até 10,67 Mg ha⁻¹. Todos esses valores demonstram a magnitude dos estoques de carbono radiculares e alertam sobre a importância de incluir essas estimativas para um melhor entendimento sobre dinâmica global de C.

3.2 Influência das raízes finas na ciclagem de nutrientes

As raízes constituem uma importante fonte e sumidouro de nutrientes nos ecossistemas terrestres. Sua produtividade é fundamental para o forrageamento de nutrientes e absorção de água, ao mesmo tempo em que constitui uma entrada primária de nutrientes no solo por meio da sua renovação (Loiola et al., 2015). Segundo King et al. (2021), a influência das raízes na ciclagem de nutrientes pode variar de acordo com o seu diâmetro, sendo as raízes finas (≤ 2 mm) as que contêm significativamente maior concentração de nutrientes, tais como nitrogênio (N), fósforo (P) e magnésio (Mg), e consequentemente uma maior contribuição em relação as raízes mais grossas.

Como já mencionado nos tópicos anteriores, as raízes finas são responsáveis por uma grande parcela da produtividade primária dos ecossistemas terrestres, podendo em determinados ecossistemas superar a produtividade aérea. Diante disso, as concentrações de nutrientes presentes nas raízes finas podem ser maiores que as presentes nas folhas das plantas e posteriormente na serapilheira (Verma et al., 2021). Isso, associado ao fato de que as raízes finas são pouco longevas e apresentam uma acelerada dinâmica de produção, substituição e decomposição, fazendo com que elas constituam uma importante via de fluxo e ciclagem de C e nutrientes nos ecossistemas terrestres (Valverde-Barrantes et al., 2015; Freschet & Roumet, 2017; Garlet & Schumacher, 2020).

Nesse sentido, estudos já demonstraram que em ecossistemas florestais, a quantidade de carbono e nutrientes devolvido ao solo pelo *turnover* das raízes finas pode ser igual ou superior ao da serapilheira (Verma et al., 2021). Gang et al. (2012), ao estudar povoamentos arbustivos em regiões semiáridas na China, verificou que a mortalidade de raízes finas incorpora anualmente no solo cerca de 1,32 g de nitrogênio (N) por metro quadrado. Em áreas semelhantes, também na China, Ma et al. (2021) verificaram que as raízes finas são responsáveis por incorporar no solo 2,3 g N m² ano⁻¹. Do mesmo modo, Yuan e Chen (2010), verificaram que em florestas boreais, as raízes finas são capazes de armazenar cerca de 50,9 kg ha⁻¹ de N e 3,63 kg ha⁻¹ de P em sua biomassa. Igualmente, Burke e Raynal (1994) verificaram que em florestas decíduas, as raízes finas ciclam anualmente 4,5-6,1 kg de cálcio, 1,1-1,4 kg de magnésio, 0,3-0,4 kg de potássio, 1,2-1,7 kg de fósforo, 20,3-27,3 kg de nitrogênio, e 1,8-2,4 kg de enxofre, em florestas dominadas por *Quercus* sp. e *Pinus* sp. no Himalaia. Complementarmente, estudos já demonstraram que há pouca retranslocação de nutrientes a partir das raízes em senescência, indicando que as raízes finas podem ser verdadeiros reservatórios de nutrientes do solo (Niinemets & Ostonen, 2020).

É importante enfatizar que o desenvolvimento das raízes no perfil do solo influencia significativamente a comunidade microbiana, principalmente por fornecer recursos orgânicos a partir da exsudação radicular (Lange et al., 2015). Isso é de grande relevância, visto que, de acordo com a vegetação, a disponibilização desses recursos no solo pode favorecer o estabelecimento de relações simbióticas entre microrganismos e as plantas, o que possibilita um melhor contato e absorção de nutrientes essenciais, promovendo, consequentemente, um incremento na biomassa vegetal (Freire et al., 2020). Efetivamente

os microrganismos do solo suprem o vegetal com nutrientes inorgânicos tais como N e P, e em troca, recebem nutrientes orgânicos oriundos da planta (Wang et al., 2019).

3.3 Amostragem de raízes e métodos analíticos

A importância ecossistêmica das raízes e a sua contribuição em diversos ciclos biogeoquímicos é evidente, porém os estudos voltados para a ciclagem e dinâmica radicular ainda são limitados, principalmente pela metodologia, referida na literatura como laboriosa e onerosa (Ma & Chen, 2016, Cimpoiașu et al., 2020, Ziegler et al., 2023). Mesmo diante do avanço significativo das metodologias para estudar processos subterrâneos, os estudos de raízes ainda são escassos e normalmente realizados nos horizontes superficiais do solo (Iversen et al., 2017; Cordeiro et al., 2020; Pathak et al., 2021), principalmente em florestas tropicais.

Estudos de dinâmica radicular utilizam uma série de métodos que podem ser invasivos/destrutivos ou minimamente/não invasivos (Cimpoiașu et al., 2020), tais como estimativas de C e N, amostragens sequenciais de solo e separação das raízes; técnicas de imagem de raios-x; técnicas isotópicas de C; técnica do núcleo de crescimento (ingrowth) e o sistema de minirhizotrons (MR) (Lambais 2015, Mendes, 2018).

3.3.1 Método de minirhizotrons (MR)

O método dos minirhizotrons (MR) possibilita a visualização direta e repetível da morfologia radicular *in situ*, sendo um método minimamente invasivo capaz de medir as respostas do desenvolvimento radicular a variações ambientais por tempo prolongado (Johnson et al., 2001). Geralmente um sistema MR utiliza um computador, uma câmera digital, uma fonte de luz montada em uma alça indicadora e tubos transparentes ou rizotubos instalados no perfil do solo em um determinado ângulo (Lambais, 2015; Cai et al., 2016).

O rizotubo é comumente instalado no solo com inclinação de 30 ou 45° em relação à horizontal, e grande parte dele é inserida na superfície, enquanto a parte externa é coberta por um plástico opaco para evitar a entrada de água de chuva ou invasão de insetos ou outros animais de pequeno porte (Mendes, 2018; Cai et al., 2016; Lambais 2015). Posteriormente, são obtidas imagens das raízes vivas e mortas desse tubo através de uma câmera de vídeo acoplada a um endoscópio, para a realização de análises laboratoriais com softwares como o Rhizogen (para plantas agrícolas) e o Raiz (para plantas arbóreas) (Hendrick & Pregitzer, 1992) que determinam os atributos radiculares.

A principal vantagem do minirhizotron é que esse sistema oferece o controle total do sistema radicular com a condição do solo num dado local, viabilizando estimativas precisas e rápidas através de amostragens detalhadas, em posições previamente selecionadas, pela visualização por janelas de observações (Garré et al., 2011; Cimpoiașu et al., 2020). Entretanto, além do alto custo, a desvantagem do método é que se trata de um ambiente artificial que não é fiel às condições encontradas em campo, adicionalmente, tem-se uma limitação no número de tratamentos, pois se trata de um ambiente espacialmente restrito (Mendes, 2018). Já foi observado também que a obtenção de dados temporais, como a longevidade de raízes finas vivas, pode ser afetada pelos próprios tubos, dessa forma o método não é indicado para estudos com menos que um ano de acompanhamento (Withington et al. 2003).

Estudos mostram a possibilidade de utilizar o MR em conjunto com outros métodos como de perfuração sequencial de solos e permite várias estimativas de produção de raízes (Li et al., 2020; Zhu et al., 2022; Ziegler et al., 2023). Para melhorar a precisão das estimativas de decomposição total de raízes finas em uma plantação de pinheiros loblolly, na costa da Carolina do Norte-EUA, Li et al. (2020) propuseram novo método (híbrido balanceado) com dois modelos que integram medições de testemunhas de solo e minirhizotrons em um método de balanço de massa. Para esse estudo, os parâmetros de entrada do teste foram biomassa de raízes finas, necromassa e taxa de renovação para o Modelo 1, e biomassa de raízes finas, necromassa e

taxa de mortalidade para o Modelo 2; com isso encontraram para cada um, respectivamente, uma taxa total de decomposição de raízes finas de $107 \pm 13 \text{ g m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ e $129 \pm 12 \text{ g m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, ademais, foram sensíveis a mudanças na biomassa de raízes finas, taxa de renovação e taxa de mortalidade.

Em um estudo realizado em floresta tropical na Amazônia central, Cordeiro et al. (2020) utilizaram minirrhizotrons até 90 cm de profundidade, que foram calibrados com raízes finas extraídas de núcleos de solo, e obtiveram resultados cuja precipitação teve correlação com a produtividade e a mortalidade das raízes nas camadas superficiais. Adicionalmente, a biomassa total de raízes finas (0–90 cm de profundidade) do estudo citado foi estimada em $13,1 \pm 1,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ ($5,7 \pm 0,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$) e a produtividade em $6,3 \pm 0,8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ($2,8 \pm 0,4 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) onde as maiores porções de 46% e 41% estavam nas camadas de solo mais profundas que 30 cm.

Já no trabalho de Lambais (2015) realizado em plantio de *Eucalyptus grandis* cultivado em latossolo, os resultados observados com os MR mostraram que na camada de 0-30 cm a textura do solo teve influência direta no comprimento radicular, acumulando um total de 30 mm^2 imagem, e de maneira contrária, mostrou uma fraca correlação entre umidade do solo e a dinâmica de raízes para textura e profundidade do solo. Dessa forma, é possível observar as possibilidades de aplicações do método de minirrhizotrons em diversos ambientes.

3.3.2 Método de balanços de massa com amostragens sequenciais de solo

A técnica do núcleo sequencial de solo fundamenta-se na observação da variação na biomassa radicular viva e/ou morta que ocorre ao longo do ano, sendo uma das primeiras metodologias utilizadas na estimativa da produção e a mortalidade de raízes finas (Mendes, 2018; Nadelhoffer, & Raich, 1992; Vogt et al., 1998). A produção radicular é estimada através da amostragem contínua em um mesmo local, por um período superior a um ano (Yuan & Chen, 2013), o que possibilita identificar a variabilidade anual e interanual na composição da biomassa (viva e morta) de raízes presentes no solo (Mendes, 2018).

O solo é coletado com auxílio de um trado, cujas dimensões variam entre 10 e 100 cm de comprimento e entre 2 e 10 cm diâmetro. Posteriormente, as raízes são lavadas para separá-las do solo (Freschet et al., 2021). Com base em amostras sequenciais de solo, a estimativa da rotatividade de raízes finas pode ser calculada através de diferentes modelos matemáticos. Estes incluem: 1) Método máximo-mínimo, o qual compara a discrepância entre a biomassa radicular máxima e mínima ao longo de um ano; 2) Método de soma de mudanças, fundamentado nas diferenças positivas estatisticamente significativas na biomassa radicular entre datas consecutivas de amostragem; 3) "Modelo compartimento-fluxo", que engloba dois compartimentos (vivos e mortos) e três fluxos (produção, mortalidade e decomposição); 4) Método da "matriz de decisão", ou cálculos de "transferência de balanceamento", que consideram mudanças significativas em raízes vivas e mortas entre datas de amostragem (Yuan & Chen, 2013).

Uma das vantagens deste método é a capacidade de capturar variações sazonais na produção de raízes finas (Yuan & Chen, 2013). Além disso, é uma técnica relativamente simples e de baixo custo, podendo ser facilmente adaptada e dimensionada em parcelas de acordo com as necessidades específicas (Freschet et al., 2021; Noguchi et al., 2017). No entanto, algumas limitações da técnica residem em um período prolongado para execução e pode ocasionar perturbações significativas em áreas experimentais de menor tamanho ou durante estudos com longa duração (Freschet et al., 2021). Por considerar a biomassa das raízes e a necromassa, a validade deste método é questionável, devido a possibilidade de superestimar a produtividade do conteúdo abaixo do solo, em virtude da variabilidade amostral e acúmulo ao longo do tempo em decorrência da frequência de coletas no mesmo ponto (Mendes, 2018). A produtividade das raízes finas também pode ser subestimada devido à ação de herbívoros, ao desprendimento, à rápida decomposição da necromassa e à complexidade na identificação e a separação desses componentes (Hendricks et al., 1993).

4. Conclusão

As raízes finas apresentam uma grande importância ecossistêmica, contribuindo consideravelmente com a ciclagem de Carbono e nutrientes do solo. Contudo, estudos acerca de sua biomassa e dinâmica de produtividade ainda são bastante limitados quando comparados com biomassa aérea e quando se leva em consideração a grande diversidade de ecossistemas terrestres. Ademais, as dificuldades metodológicas ainda são grandes limitantes dos estudos de dinâmica radicular. Assim, ressaltamos aqui a importância e necessidade de novas pesquisas científicas que busquem desenvolver métodos de análise, bem como estimar a produtividade primária subterrânea, sobretudo a de raízes finas, para que os processos envolvidos na ciclagem de carbono e nutrientes sejam mais bem elucidados.

Referências

- Abramoff, R. Z., & Finzi, A. C. (2015). Are above-and below-ground phenology in sync? *New Phytologist*, 205(3), 1054-1061.
- Addo-Danso, S. D., Prescott, C. E., & Smith, A. R. (2016). Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies: A review. *Forest Ecology and Management*, 359, 332-351.
- Aguiar, D. R. (2018). *Dinâmica e potencial de créditos de carbono na floresta manejada da Flona do Tapajós, Estado do Pará*. Tese apresentada ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor (a) em Ciências de Florestas Tropicais. Instituto Nacional de Pesquisa da Amazonia (INPA). <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/4988>.
- Albrigo, N. S. (2021). *Análise da produtividade de raízes finas para estimativas do estoque de carbono em um trecho de floresta primária de terra firme na Amazônia Ocidental*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) Fundação Universidade Federal de Rondônia, Campus de Ji-Paraná. <https://ri.unir.br/jspui/handle/123456789/3242>.
- Burke, M. K. & Raynal, D. J. (1994). Fine root growth phenology, production, and turnover in a northern hardwood forest ecosystem. *Plant and soil*. 162 (1), 135-46.
- Cai, G., Vanderborght, J., Klotzsche, A., van der Kruk, J., Neumann, J., Hermes, N., & Vereecken, H. (2016). Construction of minirhizotron facilities for investigating root zone processes. *Vadose Zone Journal*, 15(9), vzj2016-05.
- Cimpoiașu, M. O., Kuras, O., Pridmore, T., & Mooney, S. J. (2020). Potential of geoelectrical methods to monitor root zone processes and structure: A review. *Geoderma*, 365, 114232.
- Cordeiro, A. L., Norby, R. J., Andersen, K. M., Valverde-Barrantes, O., Fuchslueger, L., Oblitas, E., & Quesada, C. A. (2020). Fine-root dynamics vary with soil depth and precipitation in a low-nutrient tropical forest in the Central Amazonia. *Plant-Environment Interactions*, 1(1), 3.
- Correa, J., Postma, J. A., Watt, M., & Wojciechowski, T. (2019). Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. *Journal of experimental botany*, 70(21), 6019-6034.
- Erktan, A., McCormack, M. L., & Roumet, C. (2018). Frontiers in root ecology: recent advances and future challenges. *Plant and Soil*, 424, 1-9.
- Fialho, R. C. (2016). *Gases de efeito estufa, dinâmica de raízes finas e de carbono em solos de florestas plantadas de eucalipto*. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de PósGraduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Doctor Scientiae. Universidade Federal de Viçosa (UFV). <https://locus.ufv.br/handle/123456789/10424>.
- Finér, L., Ohashi, M., Noguchi, K., & Hirano, Y. (2011). Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. *Forest Ecology and Management*, 262(11), 2008-2023.
- Freire, G. A. P., Ventura, D. J., Fotopoulos, I. G., Rosa, D. M., Aguiar, R. G., & de Araújo, A. C. (2020). Dinâmica de serapilheira em uma área de floresta de terra firme, Amazônia Ocidental. *Nativa*, 8(3), 323-328.
- Freschet, G. T., Pagès, L., Iversen, C. M., Comas, L. H., Rewald, B., Roumet, C., & McCormack, M. L. (2021). A starting guide to root ecology: strengthening ecological concepts and standardising root classification, sampling, processing and trait measurements. *New Phytologist*, 232(3), 973-1122.
- Freschet, G. T., & Roumet, C. (2017). Sampling roots to capture plant and soil functions. *Functional Ecology*, 31(8), 1506-1518.
- Gang, H., Xue-yong, Z., Yu-qiang, L., & Jian-yuan, C. (2012). Restoration of shrub communities elevates organic carbon in arid soils of northwestern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 47, 123-132.
- Garré, S., Javaux, M., Vanderborght, J., Pagès, L., & Vereecken, H. (2011). Three-dimensional electrical resistivity tomography to monitor root zone water dynamics. *Vadose Zone Journal*, 10(1), 412-424.
- Garlet, C., & Schumacher, M. V. (2020). Biomassa e comprimento de raízes finas em uma área de restauração florestal. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 7(15), 351-361.
- Hendrick, R. L., & Pregitzer, K. S. (1992). The demography of fine roots in a northern hardwood forest. *Ecology*, 73(3), 1094-1104.

- Hendricks, J. J., Nadelhoffer, K. J., & Aber, J. D. (1993). Assessing the role of fine roots in carbon and nutrient cycling. *Trends in Ecology & Evolution*, 8(5), 174-178.
- Iversen, C. M., McCormack, M. L., Powell, A. S., Blackwood, C. B., Freschet, G. T., Kattge, J., & Violle, C. (2017). A global Fine-Root Ecology Database to address below-ground challenges in plant ecology. *New Phytologist*, 215(1), 15-26.
- Johnson, M. G., Tingey, D. T., Phillips, D. L., & Storm, M. J. (2001). Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environmental and Experimental Botany*, 45(3), 263-289.
- Jackson, R. B., Mooney, H. A., & Schulze, E. D. (1997). A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(14), 7362-7366.
- King, W. L., Yates, C. F., Guo, J., Fleishman, S. M., Trexler, R. V., Centinari, M., & Eissenstat, D. M. (2021). The hierarchy of root branching order determines bacterial composition, microbial carrying capacity and microbial filtering. *Communications biology*, 4(1), 483.
- Kulmann, M. S. S., Dick, G., Eufraide-Junior, H. J., Guerra, S. P. S., & Schumacher, M. V. (2022). Soil physical-chemical aspects influence the fine roots parameters of *Pinus elliottii* Engelm. stands in southern Brazil. *Scientia Forestalis*, 50.
- Lambais, G. R. (2015). *Produção e mortalidade de raízes finas em plantações de Eucalyptus grandis cultivados em Latossolos (Itatinga-SP)*. Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências. Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.64.2016.tde-01022016-170451>.
- Lange, M., Eisenhauer, N., Sierra, C. A., Bessler, H., Engels, C., Griffiths, R. I., & Gleixner, G. (2015). Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature communications*, 6(1), 6707.
- Li, X., Minick, K. J., Li, T., Williamson, J. C., Gavazzi, M., McNulty, S., & King, J. S. (2020). An improved method for quantifying total fine root decomposition in plantation forests combining measurements of soil coring and minirhizotrons with a mass balance model. *Tree Physiology*, 40(10), 1466-1473.
- Loiola, P. P., Scherer-Lorenzen, M., & Batalha, M. A. (2015). The role of environmental filters and functional traits in predicting the root biomass and productivity in savannas and tropical seasonal forests. *Forest Ecology and Management*, 342, 49-55.
- Ma, X. Z., Wang, X. P., Jin, Y. X., & Zhang, Y. F. (2021). Fine root production, turnover of *Reaumuria songarica* and soil carbon and nitrogen in Alxa steppe desert of NW China. *Restoration Ecology*, 29(6), e13362.
- Ma, Z., & Chen, H. Y. (2016). Effects of species diversity on fine root productivity in diverse ecosystems: A global meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 25(11), 1387-1396.
- Mendes, L. D. S. S. (2018). *Dinâmica de raízes finas em relação à disponibilidade sazonal de nutrientes e de diferentes níveis de deposição úmida em florestas tropicais*. Tese de Doutorado do Curso de Pós-graduação em Ciência do Sistema Terrestre. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- Mommer, L., Padilla, F. M., van Ruijven, J., de Caluwe, H., Smit-Tiekstra, A., Berendse, F., & de Kroon, H. (2015). Diversity effects on root length production and loss in an experimental grassland community. *Functional Ecology*, 29(12), 1560-1568.
- Morais, V. A., Santos, C. A., Mello, J. M., Dadid, H. C., Araújo, E. J. G., & Scolforo, J. R. S. (2017). Spatial and vertical distribution of litter and belowground carbon in a Brazilian cerrado vegetation. *Cerne*, 23, 43-52.
- Morandi, P. S., Marimon, B. S., Marimon-Junior, B. H., Ratter, J. A., Feldpausch, T. R., Colli, G. R., & Phillips, O. L. (2020). Tree diversity and above-ground biomass in the South America Cerrado biome and their conservation implications. *Biodiversity and Conservation*, 29, 1519-1536.
- Nadelhoffer, K. J., & Raich, J. W. (1992). Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. *Ecology*, 73(4), 1139-1147.
- Nanzer, M. C., Ensinas, S. C., Barbosa, G. F., Barreta, P. G. V., de Oliveira, T. P., da Silva, J. R. M., & Paulino, L. A. (2019). Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 18(1), 136-145.
- Navroski, M. C., Biali, L. J., Bianchin, J. E., Camargo, L., & Schumacher, M. V. (2010). Quantificação de biomassa e comprimento de raízes finas em povoamento de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 5(4), 535-540.
- Niinemets, Ü., & Ostonen, I. (2020). Plant organ senescence above-and belowground in trees: how to best salvage resources for new growth? *Tree physiology*, 40(8), 981-986.
- Noguchi, K., Tanikawa, T., Inagaki, Y., & Ishizuka, S. (2017). Calculation procedures to estimate fine root production rates in forests using two-dimensional fine root data obtained by the net sheet method. *Tree physiology*, 37(6), 697-705.
- Oliveira, P. M. R. (2017). *Controle do metabolismo e desenvolvimento da orquídea epífita *Catasetum fimbriatum* em resposta à incidência de luz no sistema radicular*. Tese apresentada ao Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo para a obtenção de título de Doutor em Ciências, na área de Botânica. Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.41.2017.tde-25072017-155340>.
- Pathak, G. C., Joshi, H., Singh, R. D., Tewari, A., Pandey, R., & Singh, S. P. (2021). Vertical root distribution in Himalayan trees: about half of roots occur below 30 cm, the generally sampled depth. *Tropical Ecology*, 62, 479-491.
- Pereira Júnior, L. R., Andrade, E. M. D., Palácio, H. A. D. Q., Raymer, P. C. L., Ribeiro Filho, J. C., & Pereira, F. J. S. (2016). Carbon stocks in a tropical dry forest in Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, 47, 32-40.
- Ramos, H. M. N., Vasconcelos, S. S., Kato, O. R., & Castellani, D. C. (2018). Above-and belowground carbon stocks of two organic, agroforestry-based oil palm production systems in eastern Amazonia. *Agroforestry systems*, 92(2), 221-237.

- Ratuchne, L. C., Koehler, H. S., Watzlawick, L. F., Sanquetta, C. R., & Schamne, P. A. (2016). Estado da arte na quantificação de biomassa em raízes de formações florestais. *Floresta e Ambiente*, 23, 450-462.
- Raven, F. E., & Eichhorn, S. (2014). *Raven Biologia Vegetal*. 8ª Edição. Rio de Janeiro.
- Rother, E. T. (2007). Revisión sistemática X revisión narrativa. *Acta Paulista de Enfermagem*, 20, v-vi. doi:org/10.1590/S0103-21002007000200001
- Sainju, U. M., & Good, R. E. (1993). Vertical root distribution in relation to soil properties in New Jersey Pinelands forests. *Plant and Soil*, 150, 87-97.
- Silver, W. L., Neff, J., McGroddy, M., Veldkamp, E., Keller, M., & Cosme, R. (2000). Effects of soil texture on belowground carbon and nutrient storage in a lowland Amazonian forest ecosystem. *Ecosystems*, 3, 193-209.
- Valverde-Barrantes, O. J., Smemo, K. A., Feinstein, L. M., Kershner, M. W., & Blackwood, C. B. (2015). Aggregated and complementary: symmetric proliferation, overyielding, and mass effects explain fine-root biomass in soil patches in a diverse temperate deciduous forest landscape. *New Phytologist*, 205(2), 731-742.
- Verma, A. K., Garkoti, S. C., Singh, S., Kumar, S., & Kumar, M. (2021). Fine root production and nutrient dynamics in relation to stand characteristics of chir pine mixed banj oak forests in central Himalaya. *Flora*, 279, 151808
- Vogt, K. A., Vogt, D. J., & Bloomfield, J. (1998). Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an ecosystem level. In: *Root Demographics and Their Efficiencies in Sustainable Agriculture, Grasslands and Forest Ecosystems: Proceedings of the 5th Symposium of the International Society of Root Research*, held 14-18 July 1996 at Madren Conference Center, Clemson University, Clemson, South Carolina, USA (pp. 687-720). Springer Netherlands.
- Wang, J. J., Bowden, R. D., Lajtha, K., Washko, S. E., Wurzbacher, S. J., & Simpson, M. J. (2019). Long-term nitrogen addition suppresses microbial degradation, enhances soil carbon storage, and alters the molecular composition of soil organic matter. *Biogeochemistry*, 142, 299-313.
- Withington, J. M., Elkin, A. D., Bułaj, B., Olesiński, J., Tracy, K. N., Bouma, T. J., & Eissenstat, D. M. (2003). The impact of material used for minirhizotron tubes for root research. *New Phytologist*, 160(3), 533-544.
- Yuan, Z. Y., & Chen, H. Y. (2010). Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age: literature review and meta-analyses. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 29(4), 204-221.
- Yuan, Z. Y., & Chen, H. Y. (2013). Simplifying the decision matrix for estimating fine root production by the sequential soil coring approach. *Acta oecologica*, 48, 54-61.
- Zeng, W., Xiang, W., Zhou, B., Ouyang, S., Zeng, Y., Chen, L., & Milcu, A. (2021). Positive tree diversity effect on fine root biomass: via density dependence rather than spatial root partitioning. *Oikos*, 130(1), 1-14.
- Zhu, L., Lin, C., Huang, C., Xiong, D., Huang, J., & Chen, G. (2022). Root estimation accuracy and sampling representativeness in relation to sample size in a subtropical evergreen broad-leaved forest: comparison between soil core and minirhizotron method. *New Forests*, 1-18.
- Ziegler, C., Kulawska, A., Kourmouli, A., Hamilton, L., Shi, Z., MacKenzie, A. R., & Johnston, I. G. (2023). Quantification and uncertainty of root growth stimulation by elevated CO₂ in a mature temperate deciduous forest. *Science of the Total Environment*, 854, 158661.