



**MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE
NGI ICMBIO CARAJÁS**

**Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do Instituto Chico
Mendes de Conservação da Biodiversidade- PIBIC/ICMBio**

**Relatório de Final
Ciclo 2021-2022**

**BIOMASSA SUBTERRÂNEA EM FORMAÇÕES DE FLORESTA
OMBRÓFILA Densa NA FLONA DE CARAJÁS, SUDESTE DO
ESTADO DO PARÁ**

Nome do Estudante: Jéssica Araújo Heringer Ribeiro

Orientador: Paulo Jardel Braz Faiad

Coorientador: Fernando da Costa Brito Lacerda

Instituição do coorientador: Universidade Federal Rural da Amazônia

**Parauapebas
Agosto/2022**

RESUMO

Devido à sua extensão territorial e complexidade estrutural, a floresta amazônica desempenha importantes serviços ecossistêmicos e exerce uma contribuição significativa no balanço global de C. Contudo, o conhecimento sobre os fatores que influenciam na dinâmica do C, principalmente no que tange as estimativas dos reservatórios subterrâneos nos ecossistemas florestais ainda são muito incipientes. Sabe-se, no entanto, que o turnover de raízes tem significativa contribuição nesse processo e que a quantificação de biomassa radicular, bem como dos fatores que a controlam, pode ajudar a entender melhor a magnitude dessa contribuição. Assim, o objetivo do trabalho é estimar os estoques de matéria orgânica (MOS), biomassa radicular (raízes finas [$\leq 2\text{mm}$] e raízes grossas [$\geq 2\text{mm}$]) e microbiana (MBC) e relacioná-los com as propriedades químicas (teor de alumínio [Al^{3+}], ferro [Fe^{2+}], fósforo disponível [P] e remanescente [P-Rem] e pH) e físicas (teor de argila) do solo, e com dados da comunidade arbórea (riqueza de espécies, densidade de indivíduos, diversidade de Shannon e área basal) em áreas de floresta ombrófila densa na FLONA de Carajás. Especificamente, o estudo foi realizado em 10 parcelas permanentes de 2000 m² subdivididas em 20 subparcelas de 10x10 m, estabelecidas na localidade do Igarapé Bahia (7 parcelas) e Serra Norte (3 parcelas). As parcelas foram inventariadas considerando todas as árvores com DAP ≥ 10 cm. Com auxílio de cilindro volumétrico (196 cm³), coletamos 3 amostras de solo (0-10 cm) em 10 subparcelas selecionadas sistematicamente em zigue-zague em cada parcela permanente, totalizando 300 amostras. As raízes foram triadas com uso pinças e categorizadas em finas ($\leq 2\text{mm}$) e grossas ($\geq 2\text{mm}$) e tiveram sua biomassa estimada por meio da massa seca (g.m²). As amostras de biomassa microbiana do solo (MBC) foram coletadas nas mesmas subparcelas selecionadas anteriormente, sendo posteriormente mescladas e compoendo uma amostra composta por parcela. As propriedades químicas e físicas do solo foram analisadas a partir de amostras compostas decorrentes da homogeneização de três subamostragens realizadas respectivamente no início, meio e fim de cada parcela. Todos os dados de solo foram coletados na camada de 0-10 cm e seguiram os protocolos usuais de processamento e análise. Hipostenizamos que: (H1) propriedades químicas e físicas do solo influenciam a comunidade arbórea; (H2) áreas com maior diversidade e densidade de árvores apresentam uma maior produção de biomassa radicular e mais MOS; e que (H3) áreas com maior biomassa radicular apresentam maior MBC. A biomassa de raízes grossas foi de 62,98 \pm 57,4 g.m², a de raízes finas foi 319,94 \pm 128,7 g.m² e a biomassa microbiana foi de 373,06 \pm 157,12 mg de C Kg⁻¹. Corroborando H1, foram encontradas correlações positivas entre a diversidade e o teor de argila ($r=0,63$; $p=0,049$) e entre área basal e pH ($r=0,67$; $p=0,035$). A diversidade também se correlacionou negativamente com o teor de P ($r=-0,57$; $p=0,083$) e P-Rem ($r=-0,81$; $p=0,005$). Verificamos relação significativa entre densidade e biomassa de raízes finas ($p=0,0007$, $r^2=0,10$), corroborando parcialmente H2. Verificamos correlação positiva e significativa entre biomassa de raízes grossas e MBC ($r=0,70$; $p=0,023$), que corrobora parcialmente H3. Esses resultados, evidenciam processos ecossistêmicos complexos entre a vegetação e os estoques nutrientes e de biomassa subterrânea, o que pode subsidiar um melhor entendimento sobre a dinâmica de C em ecossistemas tropicais.

Palavras-chave: biomassa radicular, biomassa microbiana, relação solo-vegetação.

ABSTRACT

Due to its territorial extension and structural complexity, the Amazon forest performs important ecosystem services and makes a significant contribution to the global C balance. However, knowledge about the factors that influence C dynamics, especially regarding the estimates of underground reservoirs in forest ecosystems are still very incipient. It is known, however, that root turnover has a significant contribution to this process and that the quantification of root biomass, as well as the factors that control it, can help to better understand the magnitude of this contribution. Thus, the objective of this work is to estimate the stocks of organic matter (MOS), root biomass (fine roots [$\leq 2\text{mm}$] and thick roots [$\geq 2\text{mm}$]) and microbial (MBC) and relate them to chemical properties (content of aluminum [Al^{3+}], iron [Fe^{2+}], available phosphorus [P] and remaining [P-Rem] and pH) and physical (clay content) of the soil, and with data from the tree community (species richness, density of individuals, Shannon diversity and basal area) in areas of dense ombrophylous forest in National Forest of Carajás. Specifically, the study was carried out in 10 permanent plots of 2000 m² divided into 20 subplots of 10x10 m, established in the locality of Igarapé Bahia (7 plots) and Serra Norte (3 plots). The plots were inventoried considering all trees with DBH ≥ 10 cm. With the aid of a volumetric cylinder (196 cm³), we collected 3 soil samples (0-10 cm) in 10 subplots systematically selected in a zigzag pattern in each permanent plot, totaling 300 samples. The roots were sorted using tweezers and categorized into thin ($\leq 2\text{mm}$) and thick ($\geq 2\text{mm}$) and their biomass was estimated using dry mass (g.m²). Soil microbial biomass (MBC) samples were collected in the same subplots previously selected, being later merged and composing a sample composed by plot. The chemical and physical properties of the soil were analyzed from composite samples resulting from the homogenization of three subsamplings carried out, respectively, at the beginning, middle and end of each plot. All soil data were collected in the 0-10 cm layer and followed the usual processing and analysis protocols. We hypothesized that: (H1) chemical and physical properties of the soil influence the tree community; (H2) areas with greater diversity and density of trees present a greater production of root biomass and more SOM; and that (H3) areas with higher root biomass have higher MBC. The biomass of coarse roots was 62.98 ± 57.4 g.m², that of fine roots was 319.94 ± 128.7 g.m² and the microbial biomass was 373.06 ± 157.12 mg of C Kg⁻¹. Corroborating H1, positive correlations were found between diversity and clay content ($r=0.63$; $p=0.049$) and between basal area and pH ($r=0.67$; $p=0.035$). Diversity was also negatively correlated with the content of P ($r=-0.57$; $p=0.083$) and P-Rem ($r=-0.81$; $p=0.005$). We found a significant relationship between density and biomass of fine roots ($p=0.0007$, $r^2=0.10$), partially corroborating H2. We found a positive and significant correlation between thick root biomass and MBC ($r=0.70$; $p=0.023$), which partially corroborates H3. These results evidence complex ecosystem processes between vegetation and nutrient and underground biomass stocks, which may support a better understanding of C dynamics in tropical ecosystems.

Keywords: root biomass, microbial biomass, soil-vegetation relationship.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Mapa da área de estudo, mostrando as parcelas permanentes estabelecidas nas formações de floresta ombrófila densa da Floresta Nacional de Carajás. As sete parcelas da região do Igarapé Bahia (em azul) e as três parcelas em Serra Norte (em amarelo)... 8
- Figura 2** Croqui do modelo padrão das parcelas permanentes instaladas na Floresta Nacional Carajás, indicando (em verde) as subparcelas selecionadas sistematicamente em zigue-zague onde realizamos a amostragem raízes finas e biomassa microbiana.... 10
- Figura 3.** Processamento das amostras de biomassa radicular. Coleta das amostras de raízes com auxílio de cilindro de aço inox (A); amostras identificadas e acondicionadas a 4° C em refrigerador (B); lavagem das amostras em água corrente sob malha de 0,5 mm (C); triagem manual e categorização das raízes (finas $[\leq 2\text{mm}]$ e grossas $[\geq 2\text{mm}]$) com o auxílio de pinça e paquímetro (D, E e F); pesagem das amostras em balança analítica de precisão (G); secagem das amostras em estufa para obtenção da massa seca (H)..... 11
- Figura 4.** Preparo das amostras de solo para análise de biomassa microbiana. Coletas de solo na FLONA de Carajás (A); secagem das amostras ao ar (B); processamento das amostras de solo que foram peneiradas e pesadas para a análise em laboratório especializado (C, D e E). 11
- Figura 5.** Correlação de Pearson entre as variáveis de solo biomassa microbiana [MBC], matéria orgânica [MOS], alumínio $[\text{Al}^{3+}]$, ferro $[\text{Fe}^{2+}]$, fósforo disponível [P] e remanescente [P-Rem], argila e pH) e da comunidade arbórea (riqueza [RIQ], diversidade [DIV], densidade de ind. [DENS] e área basal) em parcelas permanentes estabelecidas em floresta ombrófila na FLONA de Carajás, sudeste do estado do Pará. 12
- Figura 6.** Relação entre o número de espécies e indivíduos arbóreas e a biomassa radicular (raízes finas $[\leq 2\text{mm}]$ e raízes grossas $[\geq 2\text{mm}]$) em áreas de floresta ombrófila densa na Floresta Nacional de Carajás. 14

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	5
2. OBJETIVOS.....	7
2.1. Geral.....	7
2.2. Específicos.....	7
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	8
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	12
5. RECOMENDAÇÕES PARA O MANEJO.....	15
6. AGRADECIMENTOS.....	16
7. CITAÇÕES E REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16

1. INTRODUÇÃO

As florestas tropicais da Amazônia representam cerca de 56% das florestas tropicais do globo terrestre (CORREIA *et al.*, 2007), sendo consideradas grandes fontes de recursos naturais e de importância imprescindível para a promoção e manutenção de serviços ecossistêmicos relacionados à produtividade primária e ciclagem de água, carbono (C) e nutrientes minerais, tanto em escala local, como em escala global (SILVA *et al.*, 2021). Contudo, fatores de alterações globais como, desmatamento, queimadas e intensificação de atividades agropecuárias, que historicamente afetam o bioma Amazônico, têm acelerado perdas de hábitat e de biodiversidade (FEARNSIDE, 2005). Esses fatores, em sinergia com os efeitos das mudanças climáticas, como alterações nos regimes de precipitação e aumentos de temperatura, podem comprometer consideravelmente o funcionamento ecossistêmico e, conseqüentemente, a capacidade de promoção de serviços pela floresta Amazônica (ROMERO-SALTOS *et al.*, 2005; FISHER *et al.*, 2007; SOWERBY *et al.*, 2008).

Devido à sua extensão territorial e complexidade estrutural, a floresta amazônica brasileira tem significativa contribuição no balanço global de C (FEARNSIDE, 2008). Contudo, o conhecimento sobre a dinâmica interna do C nas florestas tropicais ainda não estão totalmente elucidados, principalmente no que diz respeito aos seus reservatórios em relação a sua variação espacial, sucessional e fisionômica. Cabe ressaltar, que a maioria dos estudos de biomassa florestal se concentrou apenas no componente acima do solo, enquanto outros reservatórios subterrâneos, como o da biomassa de raízes são extremamente restritos (RATUCHNE *et al.*, 2016). Para exemplificar a importância disso, Cerri *et al.* (2006), estimou que a floresta amazônica no Brasil teria um potencial de sequestrar C da ordem de 421 a 470 Tg ano⁻¹, desse total, cerca de 30 % (126 a 141 Tg ano⁻¹ de C) seria acumulado pelo solo. Isso é particularmente relevante, se considerarmos a Lei Nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021 que institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais, tais como os de provisão, suporte, regulação e culturais. Dentre esses serviços, destacamos os de regulamentação, que concorrem para a manutenção da estabilidade dos processos ecossistêmicos, tais como o sequestro de carbono, a purificação do ar, a moderação de eventos climáticos extremos, dentre outros. Assim, estimativas mais acuradas sobre os reservatórios de carbono florestais, incluindo os subterrâneos, podem servir de subsídio para a valoração ambiental, além de contribuir para a tomada de decisões pelo poder

público que estimulem a conservação dos ecossistemas, do solo e da biodiversidade, o que configura um dos objetivos da referida Lei federal.

Estudos anteriores já demonstraram que o C orgânico do solo é incorporado a partir da serrapilheira, do *turnover* das raízes e da exsudação do C pelas raízes finas (ADUAN *et al.*, 2003). De acordo com as características do solo, clima e cobertura vegetal, esses materiais podem apresentar origem, composição e dinâmica diferenciada, o que influencia nas taxas de produtividade e decomposição, o que torna os reservatórios de C espacialmente heterogêneos (CHRISTENSEN, 2000). É importante salientar que as raízes finas representam entre 90% e 95% do comprimento total do sistema radicular (GAITÁN *et al.*, 2005) e por serem bastante dinâmicas, contribuem significativamente para os ciclos dos nutrientes (GILL AND JACKSON, 2000) e podem ser responsáveis por uma grande proporção da produtividade primária líquida (YUAN AND CHEN, 2010), constituindo uma importante variável de qualidade do solo. Em todo caso, a decomposição e mineralização dos resíduos orgânicos no solo é de responsabilidade da biomassa microbiana (BMS) (SCHMIDT *et al.*, 2007). A BMS constitui a parte viva e também a fração de matéria orgânica do solo mais rapidamente decomposta (MENDES, 2007), apresentando um papel central no ciclo do C, constituindo também um importante compartimento a ser considerado.

Cabe ressaltar também, que estudos já demonstraram que propriedades químicas e físicas do solo, tais como o teor de alumínio, ferro, fósforo, argila e o pH podem influenciar diretamente a estrutura e a composição florística de ecossistemas florestais (CESÁRIO, 2018). Nesse sentido, sabe-se que o fósforo é reconhecido por ser um dos elementos essenciais que mais limita a produtividade primária nos ecossistemas terrestres, visto que atua em vários processos do metabolismo planta, sobretudo nos energéticos como fotossíntese (LLOYD *et al.*, 2001; ESTEFANI, 2017). A quantidade de argila, por sua vez, atua na geração de cargas negativas (capacidade de troca catiônica) e também na retenção de nutrientes no solo (BURNS *et al.*, 2013). Complementarmente, a acidez e os teores de alumínio do solo, por ser tóxico as plantas, frequentemente se relacionam de forma negativa com a vegetação (ESTEFANI, 2017). Assim, é possível que esses fatores influenciem direta ou indiretamente os reservatórios subterrâneos de carbono.

A Floresta Nacional de Carajás (FLONA de Carajás) fica localizada no sudeste do estado do Pará, na região Amazônica. É constituída por diferentes fitofisionomias que inclui um grande maciço de floresta ombrófila, além de florestas semicaducifólias e

campos rupestres singulares (GUMIER-COSTA AND SPERBER, 2009). Parte dessas fitofisionomias estão diretamente associada a grandes jazidas de ferro, o faz com que esse elemento tenha significativa influenciaram sobre a vegetação, compondo diferentes geoambientes ferruginosos na FLONA de carajás (SCHAEFER *et al.*, 2007). Dessa forma, também é possível que os teores de ferro nas áreas de floresta ombrófila densa da FLONA de Carajás também influenciem na vegetação e na dinâmica do carbono.

A FLONA de Carajás possui localização estratégica para o desenvolvimento de pesquisas científicas e uma grande importância para a conservação do bioma amazônico (STAU AND SCUPINO, 2016), além disso, estudos sobre estimativas de biomassa florestal na FLONA de Carajás são escassos, sobretudo de biomassa de raízes finas, cujo até onde sabemos ainda não foram realizados ou publicados nessa região.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

O objetivo geral do trabalho é estimar os estoques de matéria orgânica e biomassa subterrânea (microbiana e radicular) e relacioná-los com as propriedades químicas e físicas do solo e com a comunidade arbórea em formações de floresta ombrófila densa na Floresta Nacional de Carajás, com a finalidade de melhor compreender os fatores que influenciam nos reservatórios de carbono subterrâneo em florestas tropicais primárias.

2.2. Específicos

Como objetivos específicos, buscamos testar as seguintes hipóteses: (I) propriedades químicas (teor de alumínio [Al^{3+}], ferro [Fe^{2+}], fósforo disponível [P] e remanescente [P-Rem] e pH) e físicas (teor de argila) do solo influenciam a comunidade arbórea (riqueza de espécies, densidade de indivíduos, diversidade de Shannon e área basal) em áreas de floresta ombrófila densa na FLONA de Carajás; (II) áreas com maior diversidade e densidade de árvores apresentam uma maior produção de biomassa radicular (raízes finas [$\leq 2mm$] e raízes grossas [$\geq 2mm$]) e um maior estoque de matéria orgânica no solo; (III) áreas com maior biomassa radicular apresentam maior biomassa microbiana, por contribuírem para uma disponibilidade de recursos orgânicos para a comunidade de microrganismos do solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido na Floresta Nacional de Carajás, localizada na Serra dos Carajás no sudeste do estado do Pará. A permissão para a execução deste trabalho e para a coleta de amostras em campo foi concedida pelo Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade - SISBIO (Número da Permissão: 78930-1). De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região se enquadra no tipo Aw, ou seja, clima tropical quente e úmido, com precipitação média anual de 1600 mm. As temperaturas médias anuais na Serra de Carajás são em torno de 21 a 22°C.

Especificamente, selecionamos duas áreas com formações de floresta ombrófila densa localizadas, respectivamente, na região do Igarapé Bahia e em Serra Norte, nas proximidades dos corpos minerais de N1 e N2 (Figura 1). Nessas áreas foram estabelecidas 10 parcelas permanentes em forma de transectos, sendo 7 parcelas na região do Igarapé Bahia e 3 parcelas em Serra Norte. Cada parcela possui área total de 2000 m² (20 m x 100 m), subdivididas em 20 subparcelas de 10 m x 10 m.

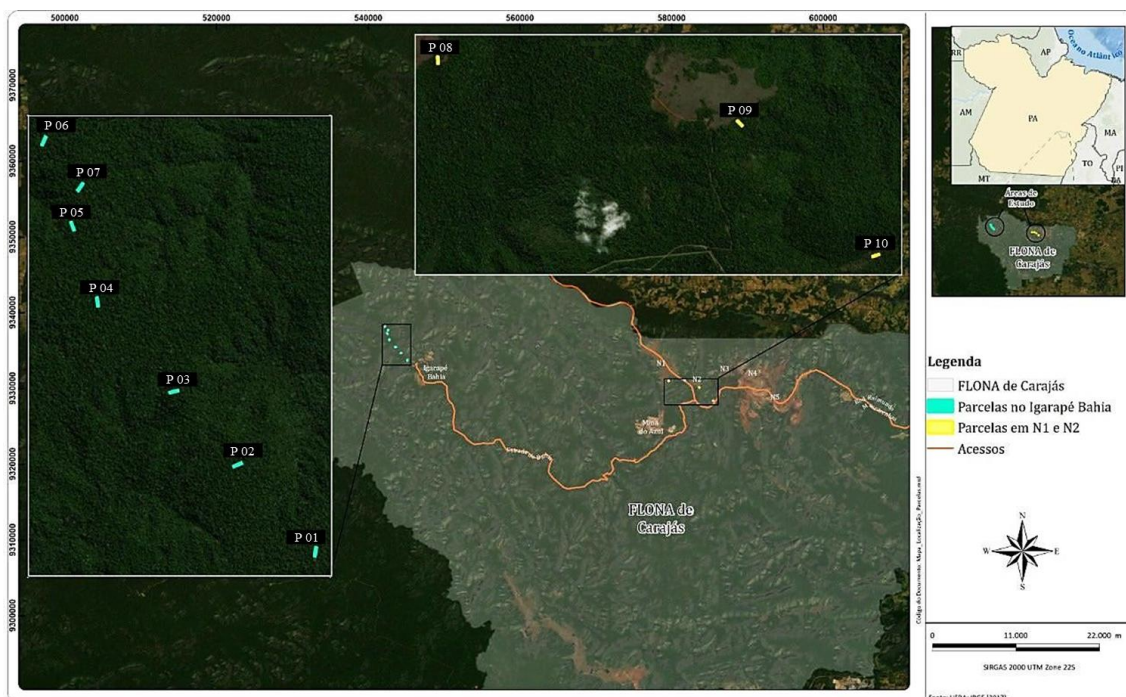


Figura 1: Mapa da área de estudo, mostrando as parcelas permanentes estabelecidas nas formações de floresta ombrófila densa da Floresta Nacional de Carajás. As sete parcelas da região do Igarapé Bahia (em azul) e as três parcelas em Serra Norte (em amarelo).

Em todas as parcelas permanentes, todos os indivíduos com DAP (diâmetro a altura do peito, medido à 1,30 m do solo) maior ou igual a 10 cm foram mensurados e

identificados por meio de placas de alumínio contendo o número da parcela e da árvore. A identificação botânica dos indivíduos foi feita em campo com auxílio de um parabolânico e por meio de coleta de material botânico e posterior consulta em herbário e literatura especializada. A partir desses dados foram obtidos a riqueza, densidade, diversidade de shannon e a área basal para cada parcela (MUELLER-DOMBOIS; ELLENBERG, 1974).

A amostragem das raízes foi feita em 10 subparcelas selecionadas sistematicamente em zigue-zague em cada parcela permanente, conforme demonstrado no croqui na Figura 2. Nas subparcelas selecionadas, foram coletados aleatoriamente três amostras de solo na profundidade de 0-10cm, totalizando 300 amostras de raízes. As amostras de solo foram coletadas com auxílio de um cilindro de aço inox (196 cm³ de volume). Após serem coletadas, as amostras foram devidamente identificadas e posteriormente congeladas (refrigeração a 4°C) até serem triadas no laboratório. Durante a triagem das raízes as amostras de solo foram lavadas em água corrente e peneiradas em malha de 0,5 mm de diâmetro até permanecerem somente as raízes e fragmentos orgânicos (LEÃO *et al.*, 2014). Posteriormente, as raízes foram separadas manualmente com o uso de pinças e, com auxílio de um paquímetro, sendo essas raízes categorizadas em raízes finas (diâmetro ≤ 2 mm) e grossas (diâmetro ≥ 2 mm) (BRAGA *et al.*, 2017; RAMOS *et al.*, 2018). Posteriormente as raízes foram secas em estufa a 70°C até atingirem peso constante. A pesagem foi realizada em balança analítica de precisão (0,0001) para a obtenção da massa seca (Figura 3). A biomassa das diferentes categorias de raízes foi obtida através da razão da massa pela área da base do cilindro (g/cm²) e em seguida transformada para g.m² (BRAGA *et al.*, 2017).

Para a biomassa microbiana do solo (MBC), coletamos nas mesmas subparcelas selecionadas anteriormente para a coleta de amostra de raízes, uma amostra de solo na profundidade de 0-10 cm. Essas amostras de solo foram mescladas compondo uma amostra composta por parcela, sendo posteriormente secas ao ar e peneiradas (Figura 4). A determinação do C na biomassa microbiana foi feito pelo método fumigação-extração conforme descrito por Vance *et al.* (1987).

A estimativa dos teores de matéria orgânica (MOS) e das demais propriedades químicas (alumínio [Al³⁺], ferro [Fe²⁺], fósforo disponível [P] e remanescente [P-Rem] e pH) e físicas (teor de argila) seguiram os protocolos usuais estabelecidos pela EMBRAPA (TEIXEIRA *et al.*, 2017) para solos brasileiros e foram feitas a partir de

amostras compostas decorrentes da homogeneização de três subamostragens realizadas respectivamente no início, meio e fim de cada parcela.

As relações entre as variáveis de solo e da comunidade arbórea foram exploradas por meio de análises de correlação de Pearson, componentes principais (ACP) e de regressão linear. As análises de correlação de Pearson e ACP foram feitas considerando uma matriz de dados composta por variáveis do solo (biomassa radicular [raízes finas com diâmetro $\leq 2\text{mm}$ e raízes grossas com diâmetro $\geq 2\text{mm}$], biomassa microbiana [MBC], matéria orgânica [MOS], alumínio [Al^{3+}], ferro [Fe^{2+}], fósforo disponível [P] e remanescente [P-Rem], argila e pH) e da vegetação (riqueza de espécies, densidade de indivíduos, diversidade de Shannon e área basal) de todas as 10 parcelas permanentes. Todas as análises foram realizadas no R 3.0.2 (R Development Core Team 2013).

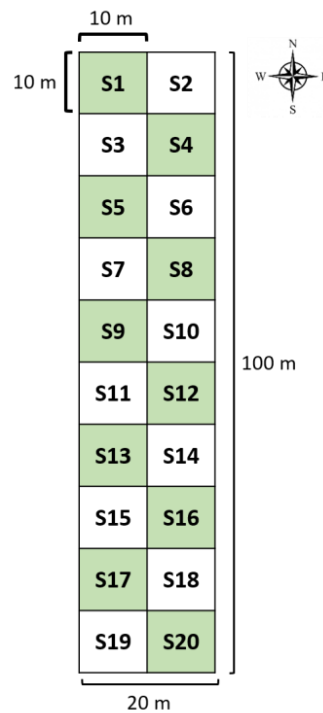


Figura 2 Croqui do modelo padrão das parcelas permanentes instaladas na Floresta Nacional Carajás, indicando (em verde) as subparcelas selecionadas sistematicamente em zigue-zague onde realizamos a amostragem raízes finas e biomassa microbiana.



Figura 3. Processamento das amostras de biomassa radicular. Coleta das amostras de raízes com auxílio de cilindro de aço inox (A); amostras identificadas e acondicionadas a 4° C em refrigerador (B); lavagem das amostras em água corrente sob malha de 0,5 mm (C); triagem manual e categorização das raízes (finas $\leq 2\text{ mm}$] e grossas $\geq 2\text{ mm}$]) com o auxílio de pinça e paquímetro (D, E e F); pesagem das amostras em balança analítica de precisão (G); secagem das amostras em estufa para obtenção da massa seca (H).



Figura 4. Preparo das amostras de solo para análise de biomassa microbiana. Coletas de solo na FLONA de Carajás (A); secagem das amostras ao ar (B); processamento das amostras de solo que foram peneiradas e pesadas para a análise em laboratório especializado (C, D e E).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A biomassa de raízes grossas foi de $62,98 \pm 57,4 \text{ g.m}^2$ e a de raízes finas foi $319,94 \pm 128,7 \text{ g.m}^2$. Esses resultados são semelhantes aos de Lima *et al.* (2020) que verificaram em uma floresta amazônica uma biomassa de $352 \pm 7.3 \text{ g.m}^2$ para raízes finas e de $137,3 \pm 20.9 \text{ g.m}^2$ de raízes grossas. A biomassa microbiana foi de $373,06 \pm 157,12 \text{ mg de C Kg}^{-1}$. Esses valores são maiores que os observados em outros ecossistemas brasileiros (NOVAK *et al.*, 2022; MATIAS *et al.*, 2009), o que se deve provavelmente a uma maior disponibilidade de recursos para a comunidade microbiana do solo, o que é típico de florestas tropicais.



Figura 5. Correlação de Pearson entre as variáveis de solo biomassa microbiana [MBC], matéria orgânica [MOS], alumínio [Al³⁺], ferro [Fe²⁺], fósforo disponível [P] e remanescente [P-Rem], argila e pH) e da comunidade arbórea (riqueza [RIQ], diversidade [DIV], densidade de ind. [DENS] e área basal) em parcelas permanentes estabelecidas em floresta ombrófila na FLONA de Carajás, sudeste do estado do Pará.

Corroborando nossa hipótese I, verificamos, por meio da correlação de Pearson (Figura 5), que as propriedades químicas e físicas do solo influenciam a comunidade arbórea nas áreas de floresta ombrófila densa na FLONA de Carajás. Correlações positivas foram verificadas entre a diversidade de Shannon e o teor de argila ($r=0,63$; $p=0,049$) e entre área basal e o pH ($r=0,67$; $p=0,035$). A diversidade também se

correlacionou negativamente com o teor de P ($r=-0,57$; $p=0,083$) e P-Rem ($r=-0,81$; $p=0,005$). Além disso, encontramos correlações marginalmente significativa e positiva entre a densidade de indivíduos e os teores de P disponível ($p=0,081$, $r=0,58$) e negativa entre a diversidade de Shannon e o P disponível ($p=-0,083$, $r=0,57$).

Já é bem conhecido que a quantidade de argila atua na geração de cargas negativas (capacidade de troca catiônica) e também na retenção de diferentes nutrientes no solo (BURNS *et al.*, 2013), o que favorece a comunidade de plantas e possibilita ocorrência de uma maior diversidade (ARAÚJO, 2015). De forma contrária, a maior disponibilidade de um nutriente específico favorece espécies que possuem estratégias ecofisiológicas mais eficientes para usufruir desse recurso, aumentando em densidade. Áreas mais densas, por sua vez, frequentemente apresentam menor diversidade de espécies pela menor variabilidade de habitats e de recursos. Esse antagonismo entre diversidade e densidade já é bastante conhecido nos mais diversos ecossistemas terrestres (ROECKER JÚNIOR, 2022), e explica a correlação do fósforo com diversidade e densidade de árvores, que foi respectivamente negativa e positiva. Cabe ressaltar que áreas mais biodiversas geralmente promovem mais serviços ecossistêmicos, inclusive os relacionados a dinâmica do C. Estudos já demonstraram, por exemplo, que em florestas com maior diversidade, ocorre um maior estoque de C (CESÁRIO, 2018). Adicionalmente, sabe-se que solos mais argilosos tendem a estocar mais carbono (CANELLAS AND SANTOS, 2005), tanto pela proteção física, quando pela manutenção da estrutura e dos agregados do solo (DENEFF *et al.*, 2007; DENEFF; SIX, 2005).

A acidez do solo, geralmente associada aos altos teores de alumínio, também tem significativa influência sobre o desenvolvimento das plantas, sendo considerado um dos fatores que mais limita a produtividade primária nos ecossistemas tropicais (ESTEFANI, 2017; ROVEDA *et al.*, 2018; MOREIRA *et al.*, 2013). Em geral, o alumínio é tóxico a maioria das plantas, comprometendo o desenvolvimento radicular e consequentemente a capacidade de absorção de água e nutrientes do solo. Além disso, em solos muito ácidos, ocorre a adsorção de importantes nutrientes essenciais como o fósforo, que fica menos disponível para as plantas (RODRIGUES *et al.*, 2016). Isso explica a correlação positiva entre o pH do solo e a área basal da comunidade arbórea. De maneira geral, esses resultados confirmam que gradientes de fertilidade, representados aqui pelos teores de P e argila (STEFANI, 2017), bem como de acidez do solo (pH) (CAVALCANTE, 2017) podem influenciar significativamente a estrutura e a

composição da vegetação, e conseqüentemente na produtividade primária, mesmo que em uma mesma fitofisionomia de vegetação.

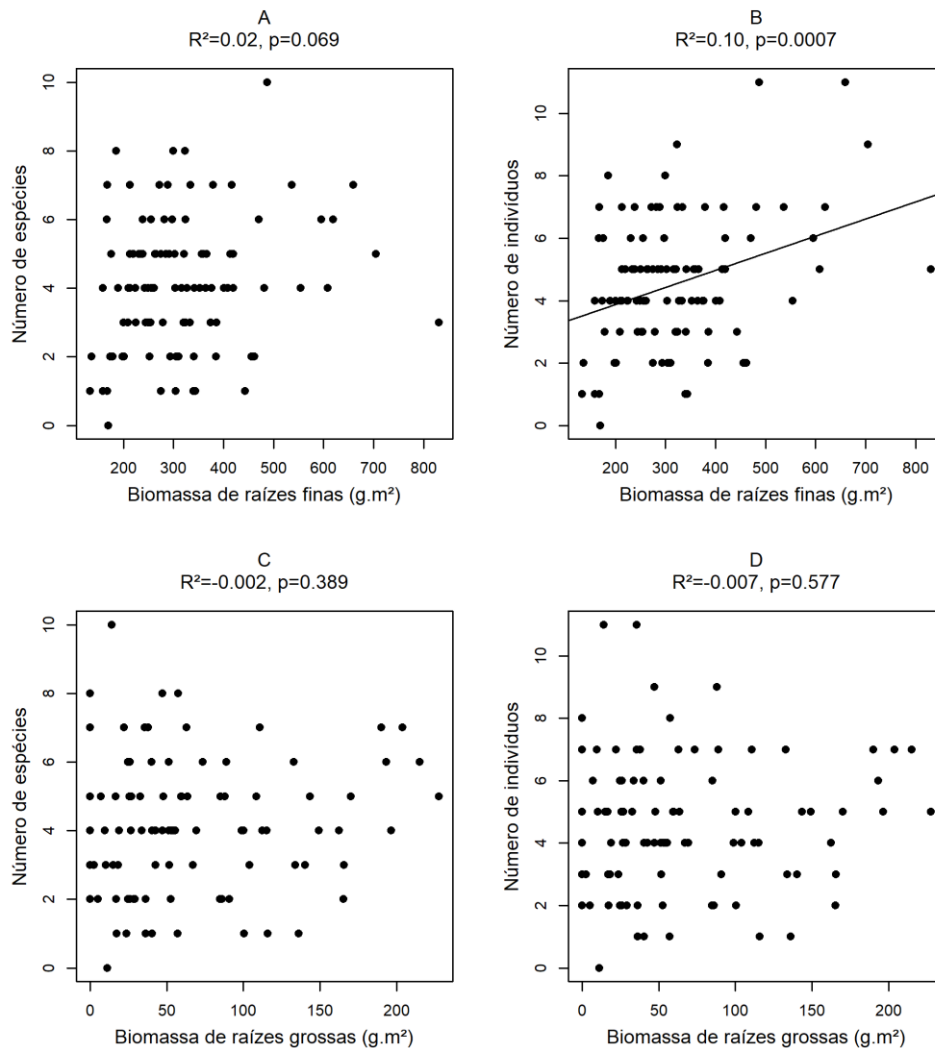


Figura 6. Relação entre o número de espécies e indivíduos arbóreas e a biomassa radicular (raízes finas [$\leq 2\text{mm}$] e raízes grossas [$\geq 2\text{mm}$]) em áreas de floresta ombrófila densa na Floresta Nacional de Carajás.

Apesar de não verificarmos influência significativa entre a densidade e diversidade de espécies sobre os teores de matéria orgânica do solo, nós verificamos uma relação significativa entre a densidade de indivíduos e a biomassa de raízes finas ($p=0.0007$, $r^2=0.10$) (Figura 6/B), corroborando parcialmente com nossa hipótese II. Esse resultado é particularmente importante, pois sugerem que os indivíduos arbóreos podem influenciar diretamente os estoques de biomassa radicular e conseqüentemente a dinâmica subterrânea do carbono em florestas tropicais (RATUCHNE *et al.*, 2016). Fato semelhante já foi verificado em outros estudos em ecossistemas florestais

(WATZLAWICK *et al.*, 2003) e também em outros tipos de vegetação (CASTRO AND KAUFFMANN, 1998).

Verificamos também correlação positiva e significativa entre a biomassa microbiana do solo e a biomassa de raízes grossas ($r=0.70$; $p=0.023$) o que corrobora nossa última hipótese de que áreas com maior biomassa radicular apresentam maior biomassa microbiana. É reconhecido que o *turnover* das raízes promove uma adição direta de material orgânico no solo, bem como a liberação de exsudados que servem de recursos energéticos para a colonização micorrízica e demais microrganismos do solo (CESÁRIO, 2018). Cabe ressaltar que uma elevada biomassa microbiana do solo intensifica a disponibilidade de nutrientes minerais que serão absorvidos pelas raízes, favorecendo a comunidade arbórea (MOREIRA *et al.*, 2013)

5. RECOMENDAÇÕES PARA O MANEJO

É sabido que a manutenção da capacidade de promoção de serviços pelas florestas tropicais está atrelada a conservação da biodiversidade, de maneira que os serviços ecossistêmicos são providos quanto mais biodiversos forem os ecossistemas. Nesse sentido, estudos anteriores já demonstraram que a biomassa radicular pode estar diretamente relacionada à diversidade de plantas (BRASSARD *et al.*, 2011, 2013; LEI *et al.*, 2012). Além disso, uma maior biomassa de raízes no solo pode representar uma maior fonte de recursos orgânicos para microrganismos, que são extremamente importantes para a manutenção da qualidade dos solos.

Apesar dos resultados apresentados aqui serem parciais, eles já trazem importantes inferências sobre a relação da comunidade arbórea com as características edáficas e com a biomassa microbiana e radicular nas áreas de floresta ombrófila na FLONA de Carajás. Com a completude dos dados e análises mais robustas (previstas para o relatório final) serão geradas informações que poderão subsidiar ações e decisões para a conservação dos ecossistemas, do solo e da biodiversidade, além de contribuir para estudos de valoração econômica dos serviços ecossistêmicos.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) pelo suporte e apoio para a execução da pesquisa científica, à Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) que disponibilizou os laboratórios e equipamentos para a realização das atividades. Agradecemos também aos orientadores do projeto, M.Sc Paulo Faiad, e Drº Fernando Lacerda, que estão sempre dispostos a auxiliar com orientações que visem o aperfeiçoamento da pesquisa. E por fim, agradecemos a equipe colaboradora, especialmente os discentes Deirilane Galvão, Matheus Borges, Lígia Almeida e Paulo Henrique que auxiliaram nas coletas de dados em campo e no processamento das amostras no laboratório.

7. CITAÇÕES E REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADUAN, R.E.; VILELA, M.D.F.; KLINK, C.A. 2003. Ciclagem de Carbono em Ecossistemas Terrestres - O Caso do Cerrado Brasileiro. *Embrapa Cerrados*: 30.
- ARAÚJO, Raphael Wakin de. Geoambientes e relação solo-vegetação no Parque Nacional das Sempre-Vivas, Minas Gerais, Brasil. 2015.
- BRAGA, E.O.; ROCHA, A.E.S.; COSTA NETO, S.V.; LIMA, T.T.S.; COSTA, L.G.S.; MIRANDA, I.D.S. 2017. Biomassa e sazonalidade das raízes finas das savanas da Amazônia Oriental. *Pesquisa Florestal Brasileira* 37: 475–483.
- BRASSARD, B.W.; CHEN, H.Y.H.; BERGERON, Y.; PARÉ, D. 2011. Differences in fine root productivity between mixed- and single-species stands. *Functional Ecology* 25: 238–246.
- BURNS, R. G. et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 58, p. 216–234, 2013.
- CANELLAS, L.; SANTOS, G. DE A. Humosfera: tratado preliminar sobre a química das substâncias húmicas, [en línea]. dos autores, 2005.
- CASTRO EA, KAUFFMANN JB. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. *Journal of Tropical Ecology* 1998; 14(1): 263-283. <http://dx.doi.org/10.1017/S0266467498000212>.
- CAVALCANTE, Everton Araújo et al. **Caracterização física e química do solo sob dois castanhais nativos e variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de um solo sob floresta ombrófila densa**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Oeste do Pará.
- CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; VOLKOFF, B. & RONDÓN, M.A. Potential of soil carbon sequestration in the Amazonian Tropical Rainforest. In: Lal, R.; Cerri, C.C.; Bernoux, M.; Etchevers, J. & Cerri, C.E.P. Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth, 2006b. p.245-266.
- CESÁRIO, FERNANDO VIEIRA. Funcionamento e propriedades ecossistêmicas da vegetação e dos solos na Floresta Tropical Amazônica. **Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2018.
- CHRISTENSEN, B. T. Organic matter in soil: structure, function and turnover. *Plant Production*, v. 30, p. 95. 2000.

- CORREIA, F.W.S.; MANZI, A.O.; CANDIDO, L.A.; DOS SANTOS, R.M.N.; PAULIQUEVIS, T. 2007. Balanço de umidade na Amazônia e sua sensibilidade às mudanças na cobertura vegetal. *Ciência e Cultura* 59: 39–43.
- DENEF, K. et al. Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 39, n. 5, p. 1165–1172, 2007.
- DENEF, K.; SIX, J. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization. *European Journal of Soil Science*, v. 56, p. 469–479, 2005.
- FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e consequências. *Megadiversidade*, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 113-123, 2005.
- FEARNSIDE, P.M. 2008. Quantificação Do Serviço Ambiental Do Carbono Nas Florestas Amazônicas Brasileiras. *Oecologia Australis* 12: 743–756.
- FISHER, R.A.; WILLIAMS, M.; DA COSTA, A.L.; MALHI, Y.; DA COSTA, R.F.; ALMEIDA, S.; ET AL. 2007. The response of an Eastern Amazonian rain forest to drought stress: Results and modelling analyses from a throughfall exclusion experiment. *Global Change Biology* 13: 2361–2378.
- GAITÁN JJ, PENÓN EA, COSTA MC. Distribución de raíces finas de *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* y su relación con algunas propiedades del suelo. *Ciência Florestal* 2005; 15(1): 33-41.
- GILL, R.A.; JACKSON, R.B. 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist* 147: 13–31.
- GUMIER-COSTA, F.; SPERBER, C.F. 2009. Roadkills of vertebrates in carajas national forest, Para, Brazil. *Acta Amazonica* 39: 459–466.
- LEÃO, F.M.; MIRANDA, I.S.; JARDIM, F.C. DA S. 2014. Fine root biomass in gaps of “Terra Firme” forest in eastern Amazonia. *Revista de Ciências Agrárias* 57: 130–137.
- LEI, P.; SCHERER-LORENZEN, M.; BAUHUS, J. 2012. The effect of tree species diversity on fine-root production in a young temperate forest. *Oecologia* 169: 1105–1115.
- LIMA, Tâmara Thaiz Santana et al. 2020. Biomass of fine roots in different land cover types at the ‘arc of deforestation’, Brazil. *Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, v. 63.
- LLOYD, J. et al. 1.8 - Should Phosphorus Availability Be Constraining Moist Tropical Forest Responses to Increasing CO₂ Concentrations? In: *Global Biogeochemical Cycles in the Climate System*. San Diego: Academic Press, 2001. p. 95–114.
- MATIAS, Maria da Conceição Bezerra da Silva et al. Biomassa microbiana e estoques de C e N do solo em diferentes sistemas de manejo, no Cerrado do Estado do Piauí. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 31, p. 517-521, 2009.
- MENDES, F.B. DOS R.J.I. DE C. 2007. Biomassa Microbiana do Solo. *Embrapa Cerrados Documentos* 205.
- MOREIRA, F. M. S.; CARES, J. E.; ZANETTI, R.; STÜRMER, S. L. O ecossistema do solo: componentes, relações ecológicas e efeitos na produção vegetal. Lavras: Ed. UFLA, 2013. 352p.:il.;17x24cm.
- MUELLER-DOMBOIS D, ELLENBERG H (1974) *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. John Wiley & Sons, New York
- NOVAK, Elaine et al. Biomassa e atividade microbiana do solo sob diferentes coberturas vegetais em Região Cerrado-Mata Atlântica. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 15, n. 3, p. 1-16, 2022.

- R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- 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. *Agroforest Syst* 92: 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.
- ROECKER JÚNIOR, Djalma et al. Efeitos da diversidade funcional de sistemas agroflorestais sobre estratégias ecológicas de plantas espontâneas. 2022.
- RODRIGUES, A. L.; WATZLAWICK, L. F.; GENÚ, A. M.; HESS, A. F.; EBLING, A. A. Atributos de um soloflorestal em uma topossequência e relações com a comunidade arbórea. *Floresta*, v. 46, n. 2, p. 145-154, 2016.
- ROMERO-SALTOS, H.; STERNBERG, L.D.S.L.; MOREIRA, M.Z.; NEPSTAD, D.C. 2005. Rainfall exclusion in an eastern Amazonian forest alters soil water movement and depth of water uptake. *American Journal of Botany* 92: 443–455.
- ROVEDA, Marcelo et al. Modelagem geoestatística da estrutura espacial arbórea e dos atributos do solo em Floresta Ombrófila Mista. *Floresta*, v. 48, n. 1, p. 67-76, 2018.
- SCHAEFER, C. E. G. R., F. N. B. SIMAS , B. A. F. MENDONÇA, A. S.S. RIBEIRO, W. FERREIRA JÚNIOR, J. NUNES & G. R. CORRÊA, 2007. Geodiversidade dos ambientes de canga na região de Carajás – PA: 1-71. Relatório técnico. [s. n.], Viçosa.
- SCHMIDT, S.K.; COSTELLO, E.K.; NEMERGUT, D.R.; CLEVELAND, C.C.; REED, S.C.; WEINTRAUB, M.N.; ET AL. 2007. Biogeochemical Consequences of Rapid Microbial Turnover. *Ecology* 88: 1379–1385.
- SILVA, L. DE J. DE S.; MENEGHET, G.A.; PINHEIRO, OSÉ O. DA C. 2021. Elementos Para a Discussão Sobre Políticas E Programas De Preservação Dos Serviços Ambientais No Amazonas. *Terceira Margem Amazônia* 6: 85–104.
- SOWERBY, A.; EMMETT, B.A.; TIETEMA, A.; BEIER, C. 2008. Contrasting effects of repeated summer drought on soil carbon efflux in hydric and mesic heathland soils. *Global Change Biology* 14: 2388–2404.
- STAU, D. C. P.; SCUPINO, M. R. C. Plano de Manejo da Floresta Nacional de Carajás. Volume I. Brasília: ICMBIO, 2016.
- STEFANI, EDSON JUNIOR FERREIRA, 1984-St32d SteDinâmica do carbono, produção e decomposição de serapilheira, estoque e produção de raiz fina na floresta ombrófila densa atlântica no Parque Estadual da Serra do Mar / Edson Junior Ferreira Stefani. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A. I.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. 3° ed, Brasília - DF, p. 573, 2017.
- VANCE, Eric D.; BROOKES, Peter C.; JENKINSON, David S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil biology and Biochemistry*, v. 19, n. 6, p. 703-707, 1987.
- WATZLAWICK LF, SANQUETTA CR, ARCE JE, BALBINOT R. Quantificação de biomassa total e carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (BERT.) O. Kuntze no sul do estado do Paraná, Brasil. *Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais* 2003; 1(2): 63-68.
- YUAN, Z.Y.; CHEN, H.Y.H. 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: 204–221.