



**Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI**  
**Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais - CFT**

**EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DO TRONCO EM ÁRVORES DE UMA FLORESTA DE  
TERRA FIRME NA AMAZÔNIA CENTRAL**

**EDSON AUGUSTO TAVARES SANTIAGO BORGES**

**Manaus, Amazonas  
2024**



**Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI**  
**Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais - CFT**

**EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DO TRONCO EM ÁRVORES DE UMA FLORESTA DE  
TERRA FIRME NA AMAZÔNIA CENTRAL**

**Orientador:** Dr. Kolby Jeremiah Jardine

**Coorientador:** Dr. Bruno Oliva Gimenez

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências de Florestas Tropicais.

**Manaus, Amazonas**  
**2024**

Catálogo na Publicação (CIP-Brasil)

---

B732b Borges, Edson Augusto Tavares Santiago  
Efluxo de co2 do tronco em árvores de uma floresta de terra firme na  
Amazônia Central / Edson Augusto Tavares Santiago Borges; orientador  
Kolby Jeremiah Jardine; coorientador Bruno Oliva Gimenez. - Manaus: [s.l.],  
2024.

4,34 MB  
45p. : il. color.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências de  
Florestas Tropicais) - Coordenação do Programa de Pós-Graduação, INPA,  
2024.

1. Ciclo do carbono. 2. Densidade da madeira. 3. Florestas tropicais. I.  
Jardine, Kolby Jeremiah. II. Gimenez, Bruno Oliva. III. Título

CDD 582.16 811 3

---



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÃO



## PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

### ATA DE DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO - MESTRADO

Ata da Defesa remota de **EDSON AUGUSTO TAVARES SANTIAGO BORGES**, ocorrida no dia 17/01/2024, via plataforma de videoconferência Zoom.

Aos 17 dias de janeiro de 2024, às 09h00 (horário de Manaus/AM), realizou-se a Defesa Pública de Dissertação de **EDSON AUGUSTO TAVARES SANTIAGO BORGES**, aluno do Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Ciências de Florestas Tropicais, intitulada "**Efluxo de CO<sub>2</sub> do tronco em árvores de uma floresta de terra firme na Amazônia Central**", sob a orientação do Dr. Kolby Jeremiah Jardine (INPA), e coorientação do Dr. Bruno Oliva Gimenez (INPA), em conformidade com o Art. 52 do Regimento Geral da Pós-Graduação do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (MCTI/INPA) e Art. 67 do Regimento Interno do Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais, como parte das atividades para conclusão e obtenção do Título de Mestre em Ciências de Florestas Tropicais. A **Banca Examinadora** foi constituída pelos seguintes membros: Liliane Martins Minhós (GCAP/IPAAM), João Victor Figueiredo Cardoso Rodrigues (UFAM), Moemy Gomes de Moraes (UFG), e tendo como suplentes os seguintes membros: Israel de Jesus Sampaio Filho (INPA), Barbara Bomfim Fernandes (WWF), Adriano José Nogueira Lima (INPA). O Presidente da Banca Examinadora deu início à sessão e informou os procedimentos do exame. O aluno fez uma exposição do seu estudo e ao término foi arguido oralmente pelos membros da Comissão. Após as arguições os membros da banca se reuniram para avaliação e chegaram ao seguinte parecer:

Nome	Parecer	Assinaturas
Moemy Gomes de Moraes	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovou <input type="checkbox"/> Reprovou	 Documento assinado digitalmente: MOEMY GOMES DE MORAES Data: 17/01/2024 14:47:20-0900 Verifique em <a href="https://validar.in.gov.br">https://validar.in.gov.br</a>
João Victor Figueiredo Cardoso Rodrigues	<input type="checkbox"/> Aprovou <input type="checkbox"/> Reprovou	 Documento assinado digitalmente: JOAO VICTOR FIGUEIREDO CARDOSO RODRIGU Data: 24/01/2024 11:21:56-0190 Verifique em <a href="https://validar.in.gov.br">https://validar.in.gov.br</a>
Israel de Jesus Sampaio Filho	<input type="checkbox"/> Aprovou <input type="checkbox"/> Reprovou	 ISRAEL DE JESUS SAMPAIO FILHO Data: 17/01/2024 15:29:09-0900 Verifique em <a href="https://validar.in.gov.br">https://validar.in.gov.br</a>
<b>Menção:</b>	<input type="checkbox"/> "Com Distinção" <input type="checkbox"/> "Com Louvor" <input type="checkbox"/> "C"	

Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente Ata que, após lida e aprovada, foi assinada pela Coordenação

**Kolby Jeremiah Jardine**  
Presidente da Banca / Orientador

  
Adriano José Nogueira Lima  
Coordenador do PPG-CFT  
PO. N° 392/2023

**Adriano José Nogueira Lima**  
Coordenador do PPG-CFT  
PO. N° 392/2023

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente queria agradecer a Deus e a força de todos os orixás que me guiaram durante a realização desta pesquisa.

Aos meus pais, Edson e Glaucilene e a minha irmã Lara, juntamente com meus sobrinhos Miguel e Milena, por todo o suporte emocional e de orgulho frente a este mestrado.

Aos amigos que fiz durante estes dois anos, especialmente Antoniele, Ruiro, Sarah, Alicia, Thiago, Regison, Débora, Arrildo, Daisy, Yago, Yanara, que foram importantes nos momentos de alegria, nas dificuldades e em todo o suporte para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Laboratório de Manejo Floresta do (LMF) do INPA, e ao projeto INCT-Madeiras da Amazônia e NGEI-tropics por todo suporte financeiro, científico e logístico nas coletas de campo e no desenvolvimento do trabalho.

Ao meu orientador Dr. Kolby Jardine, ao meu coorientador Dr. Bruno Gimenez e os vários pesquisadores que contribuíram na criação e no desenvolvimento deste projeto.

Aos funcionários da ZF-2, de modo especial ao Matapi, Roni e a Dona Néia que passaram meses comigo em coletas de campo.

Ao INPA, PPG-CFT, Capes e Fapeam pela oportunidade de ingressar no mestrado e ao CNPQ pela concessão da bolsa.

E por fim queria agradecer ao Amazonas, a Manaus e em primeiro lugar a floresta amazônica, centro deste estudo, por me proporcionar esta experiência indescritível de compreender melhor a sua dinâmica e a sua importância para a biodiversidade e para o clima global.

Dedico esta pesquisa a minha amiga e irmã, que infelizmente não poderá participar deste momento, mas que tinha grande admiração pelo meu trabalho: Amanda Moreira Siqueira.

Muito obrigado a todos!

## RESUMO

O efluxo de dióxido de carbono no tronco de árvores (Ea) representa uma fração substancial na respiração do ecossistema. No entanto, existem poucos estudos que expliquem os efeitos das diferentes características funcionais das plantas nas taxas de Ea, além da sazonalidade (estações seca e chuvosa) e de fatores ambientais na Amazônia. Isso é, em parte, devido à grande diversidade de espécies e os desafios em montar sistemas robustos que sejam capazes de medir Ea com um alto grau de eficiência sob condições ambientais desafiadoras como a alta umidade e eventos de precipitações intensas que ocorrem na Amazônia. Nesse sentido, a presente dissertação teve como objetivo estudar a dinâmica do efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco (Ea) em espécies com diferentes densidades da madeira durante as estações seca e chuvosa, em uma floresta de terra firme manejada experimentalmente na Amazônia Central. O estudo foi realizado na Estação Experimental de Silvicultura Tropical, Núcleo ZF2, gerida pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Para esta pesquisa foi utilizado um sistema portátil e dinâmico de medição, onde foram medidos durante 8 meses, as variações de Ea em 30 indivíduos arbóreos de diferentes espécies e distribuídos em 3 classes de densidade da madeira (alta, média e baixa densidade). Como forma de padronização das coletas de Ea, estas foram realizadas em cada indivíduo por um período de 24 horas, numa alta frequência temporal (medidas a cada 30 segundos), durante os períodos seco e chuvoso. Os resultados obtidos por este estudo mostraram que as espécies com alta densidade da madeira apresentam maiores valores de Ea em ambos os períodos sazonais quando comparados com as espécies de baixa densidade da madeira. Foi encontrada uma relação inversamente proporcional entre Ea e a temperatura do tronco. Adicionalmente, também observou-se, uma relação inversamente proporcional entre Ea e a velocidade de seiva xilemática para os grupos de alta e média densidade da madeira durante o período seco, e para o grupo de baixa densidade durante o período chuvoso. Também foi encontrado uma relação positiva entre o efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco (Ea) e o teor de água nas camadas superficiais do solo. As variáveis altura total (Ht) e diâmetro na altura do peito (DAP) das árvores selecionadas por este estudo não apresentaram correlações com Ea, entretanto para as variáveis Incremento Periódico Anual (IPA) e diâmetro da copa foi encontrada uma baixa correlação positiva com Ea. Por fim, este estudo traz importantes contribuições para uma melhor compreensão da dinâmica do CO<sub>2</sub> em florestas tropicais e melhorias dos modelos climáticos atuais.

**Palavras-chaves:** Florestas tropicais; Ciclo do carbono; Sazonalidade; Densidade da madeira

## ABSTRACT

The efflux of carbon dioxide in the tree trunk ( $E_a$ ) represents a substantial fraction of the ecosystem's respiration. However, there are few studies that explain the effects of different plant functional characteristics on  $E_a$  rates, in addition to seasonality (dry and rainy seasons) and environmental factors in the Amazon. This is partly due to the great diversity of species and the challenges in setting up robust systems that are able to measure  $E_a$  with a high degree of efficiency under challenging environmental conditions such as the high humidity and intense rainfall events that occur in the Amazon. With this in mind, the aim of this dissertation was to study the dynamics of trunk CO<sub>2</sub> efflux ( $E_a$ ) in species with different wood densities during the dry and rainy seasons in an experimentally managed terra firme forest in the Central Amazon. The study was carried out at the Experimental Station for Tropical Silviculture, Nucleus ZF2, managed by the National Institute for Amazonian Research (INPA). For this study, a portable and dynamic measurement system was used to measure  $E_a$  variations in 30 trees of different species over a period of 8 months, distributed into 3 wood density classes (high, medium and low density). In order to standardize the  $E_a$  measurements, they were taken from each individual over a 24-hour period, at a high temporal frequency (measurements every 30 seconds), during the dry and rainy periods. The results obtained from this study showed that species with high wood density have higher  $E_a$  values in both seasonal periods when compared to species with low wood density. An inversely proportional relationship was found between  $E_a$  and trunk temperature. In addition, an inversely proportional relationship between  $E_a$  and xylem sap velocity was also observed for the high and medium wood density groups during the dry period, and for the low density group during the rainy period. A positive relationship was also found between the CO<sub>2</sub> efflux in the trunk ( $E_a$ ) and the water content in the surface layers of the soil. The variables total height (Ht) and diameter at breast height (DAP) of the trees selected for this study showed no correlation with  $E_a$ , while the variables Annual Periodic Increment (IPA) and crown diameter showed a low positive correlation with  $E_a$ . Finally, this study makes important contributions to a better understanding of CO<sub>2</sub> dynamics in tropical forests and improvements to current climate models.

**Keywords:** Tropical forests; Carbon cycle; Seasonality; Wood density.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	5
<b>2.1 A floresta amazônica e a mudança do clima</b> .....	5
<b>2.2 Ciclo do carbono</b> .....	5
<b>2.3 Respiração autotrófica</b> .....	7
<b>2.4 O efluxo de CO<sub>2</sub> na superfície do tronco</b> .....	8
<b>2.5 Fisiologia do tronco e a densidade da madeira</b> .....	9
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	10
Objetivo geral .....	10
Objetivos específicos .....	10
Hipóteses científicas .....	10
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	11
<b>4.1 Caracterização da área de Estudo</b> .....	11
<b>4.2 Aquisição de dados</b> .....	14
<b>4.2.1 Seleção das amostras</b> .....	14
<b>4.2.2 Densidade da madeira</b> .....	14
<b>4.2.3 Efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco</b> .....	17
<b>4.2.4 Temperatura do tronco</b> .....	20
<b>4.2.5 Velocidade de seiva xilemática</b> .....	20
<b>4.2.6 Incremento diamétrico</b> .....	21
<b>4.2.7 Diâmetro à altura do peito (DAP), Diâmetro da copa e altura total</b> .....	22
<b>4.2.8 Teor de água superficial no solo</b> .....	22



4.3 Análises estatísticas.....	23
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>25</b>
5.1 Quantificação do efluxo de CO <sub>2</sub> na superfície do tronco em função da densidade da madeira no período chuvoso e seco.....	25
5.2 Relação do efluxo de CO <sub>2</sub> com a variável da velocidade do fluxo de seiva e o teor de água superficial no solo.....	29
5.3 O efluxo de CO <sub>2</sub> , e a temperatura do tronco.....	33
5.4 Correlação das variáveis altura total, Incremento Periódico anual (IPA), DAP, diâmetro da copa com o efluxo de CO <sub>2</sub> no tronco. ....	35
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>37</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>38</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localização da área de estudo (Bionte) onde esta dissertação foi desenvolvida.....	12
<b>Figura 2.</b> Precipitação média histórica (INMET) entre os anos 1981-2010 (colunas em azul claro), Embrapa (1980-2016) para a região de Manaus (colunas em azul escuro) e a média da precipitação e da temperatura (sensor de temperatura instalado na altura de 25 metros em uma torre de monitoramento) para a ZF2 (área de estudo). Período: meses de janeiro a abril (2023) e de maio a dezembro (2022).....	13
<b>Figura 3.</b> Esquema dos componentes do sistema portátil de medidas do Efluxo de CO <sub>2</sub> instalado no tronco .....	17
<b>Figura 4.</b> (a) - sistema portátil de respiração instalado em campo; (b) - câmara instalada no tronco.....	19
<b>Figura 5.</b> Sensor de fluxo de seiva instalados em indivíduos do projeto Bionte.....	21
<b>Figura 6.</b> Padrão da variável Ea ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) em função do espectro de densidade da madeira nos períodos chuvoso e seco, assumindo maiores valores para as espécies com alta densidade da madeira nos dois períodos sendo as maiores taxas no período seco.....	25
<b>Figura 7.</b> Box plots da com a comparação de médias (ANOVA) da variável Ea ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) em função do espectro de densidade da madeira nos períodos chuvoso e seco, assumindo maiores valores para as espécies com alta densidade da madeira nos dois períodos sendo as maiores taxas no período seco. P valor com significância ( $p < 0.01$ ).....	27
<b>Figura 8.</b> Comparação do Efluxo de CO <sub>2</sub> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) no período chuvoso e seco, assumindo maiores valores no período seco.....	28
<b>Figura 9.</b> Padrão da variável Ea ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) correlacionados com a velocidade do fluxo de seiva ( $\text{cm hr}^{-1}$ ) para as espécies de alta, média e baixa densidade da madeira, no período chuvoso e seco.....	31
<b>Figura 10.</b> Efluxo de CO <sub>2</sub> no tronco ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) correlacionado com o teor de água superficial no solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ).....	32
<b>Figura 11.</b> Padrão geral da variável Ea ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) correlacionados com a temperatura do tronco ( $^{\circ}\text{C}$ ) para espécies de alta, média e baixa densidade da madeira, dividida no período chuvoso e seco.....	34

**Figura 12.** Gráfico de correlação das variáveis incremento periódico anual (IPA)(cm), diâmetro da copa (m), altura da planta (m) e DAP (cm) com o Efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).....36

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Descrição das espécies selecionadas nos diferentes grupos de densidade da madeira, e as respectivas informações: diâmetro da copa (m), altura total (m), Incremento Periódico Anual (IPA) (cm), diâmetro na altura do peito (DAP)(cm) e densidade básica da madeira ( $\text{g cm}^{-3}$ ).....	15
<b>Tabela 2.</b> Escala de probabilidade (IPCC).....	24
<b>Tabela 3.</b> Comparação entre estudos feitos avaliando o Efluxo de $\text{CO}_2$ em florestas tropicais.....	26
<b>Tabela 4.</b> Correlação entre a temperatura do tronco ( $^{\circ}\text{C}$ ) e a variável $E_a$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) para espécies de alta, média e baixa densidade da madeira, dividida no período seco.....	36

## 1. INTRODUÇÃO

As florestas tropicais desempenham papel fundamental no equilíbrio dinâmico da atmosfera e o funcionamento destes ecossistemas é fortemente afetado pela mudança do clima (Fearnside, 2008). Desde o início da era industrial as concentrações globais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) passaram de 280 ppm (partes por milhão) para mais de 420 ppm nos dias atuais e com projeção de alcançar até 670 ppm nos próximos 30 anos, caso as emissões não diminuam (IPCC, 2021; NOAA, 2022).

Nos diferentes cenários de emissões de gases de efeito estufa (GEEs) para a atmosfera, projeta-se que os sumidouros de carbono, como por exemplo as florestas tropicais, serão menos eficazes em retardar o acúmulo de CO<sub>2</sub> na atmosfera (IPCC, 2021), alguns estudos já têm mostrado que a parte da Amazônia Oriental tem maiores emissões totais de carbono, demonstrando redução na eficiência da floresta como sumidouro de carbono (Gatti et al., 2021).

A dinâmica do carbono, o ciclo hidrológico e o fluxo de energia nos diferentes ecossistemas são influenciados pelas alterações na taxa de precipitação e o aumento da temperatura decorrentes da mudança do clima atual (Artaxo, 2020). Embora exista uma ampla variedade de estudos sobre estas alterações (Smith et al., 2020; Gora e Muelbert, 2021; Gatti., et al., 2021; Detto e Pacala, 2022 e Aguirre-Gutiérrez et al., 2022), ainda existem grandes questionamentos sobre a eficiência da floresta amazônica como sumidouro de carbono em resposta ao aumento da temperatura e déficit hídrico, especialmente em eventos de secas severas (Brienen et al., 2015).

Alguns modelos climáticos globais presumem que os biomas tropicais irão passar por secas extremas, podendo aumentar a aridez durante o século XXI (Huang et al., 2017; Xu et al., 2019; Moura, 2020 e IPCC, 2021). Neste sentido, para a predição de modelos climáticos globais com menores incertezas (Jones, 2000; Katz, 2002) é fundamental conhecer o ciclo do carbono frente a estas mudanças e a sua compartimentalização dentro da floresta amazônica.

Estima-se que para a floresta amazônica cerca de 70% do carbono fixado via fotossíntese retorna para a atmosfera pelo processo de respiração (Chambers et al., 2004), o que indica que a mesma possui baixa eficiência de uso do carbono (EUC) (Amthor, 2000; Valentini et al., 2000, Teixeira, 2010;

Jardine et al., 2022). Esta eficiência pode ser ainda menor, frente à mudança do clima, com a alteração das condições ambientais, que irá refletir de maneira direta em vários processos fisiológicos e metabólicos, entre eles nas taxas de assimilação de CO<sub>2</sub> via fotossíntese e na emissão de CO<sub>2</sub> pela respiração da floresta.

Nas florestas tropicais a respiração autotrófica contribui com até 24 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> emitidos para a atmosfera (Chambers et al., 2004; Malhi, 2012). As árvores que são organismos autotróficos, sintetizam os carboidratos durante a fotossíntese e que posteriormente podem ser consumidos durante o processo de respiração para a conversão de energia que será utilizada para a formação e manutenção dos tecidos celulares. Dentre os componentes da respiração autotrófica, as folhas, raízes e tronco apresentam maior contribuição, sendo 11,9 ± 4,0, 7,4 ± 0,5 e 5,1 ± 0,5 mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente (Malhi et al., 2012).

A compreensão sobre a respiração do tronco e dos tecidos lenhosos é ainda deficiente, principalmente quando comparada com o conhecimento de trocas gasosas de CO<sub>2</sub> a nível foliar. No entanto, à medida que as árvores crescem, a biomassa é alocada principalmente nos troncos e nos galhos. De acordo com Silva (2007), a contribuição do tronco à massa total da árvore acima do nível do solo é de 69% e 30% da massa fresca de uma árvore é carbono. Logo, o tronco constitui o maior sumidouro vivo de emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub> em escala global (Cuny et al., 2015).

A caracterização da respiração em diferentes condições ambientais, principalmente em eventos de estresse climático e as suas relações com a fisiologia das árvores é um importante componente para o entendimento do processo da respiração autotrófica, no entanto poucos estudos relacionaram gradientes ambientais com a respiração autotrófica em árvores de florestas tropicais. Além disso, elucidar os caminhos do carbono no metabolismo da planta, tanto em eventos extremos, como secas prolongadas, assim como em condições normais, é de extrema importância para se compreender como ocorre a compartimentalização do processo do efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco (Ea).

O efluxo de CO<sub>2</sub> pelo tronco (Ea), acontece por difusão através do gradiente de concentração entre a casca e o ar ambiente (Mcguire e Teskey, 2004). Este não pode ser considerado uma quantificação direta da respiração do tronco, pois a respiração pode ser influenciada pelo transporte de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (ácido

carbônico) interno dissolvido na água do xilema (Bloemen et al., 2013; Mcguire e Teskey, 2004). Além disso, alguns fatores, como o crescimento e a densidade da madeira, podem influenciar as taxas de emissões do efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco, devido a estratégia de crescimento da planta. Outras metodologias como a correlação do efluxo de CO<sub>2</sub> com variáveis ambientais como o teor de água superficial no solo, temperatura e a velocidade do fluxo de seiva são necessários para melhorar as estimativas atuais do processo e fornecer informações para os modelos de previsão do clima (Roderick, 2000; Trumbore et al., 2013).

Diante disso, o Laboratório de Manejo Florestal do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA-LMF) e o Laboratório de Lawrence Berkeley nos Estados Unidos por meio de um projeto de cooperação científica internacional intitulado “Next Generation Ecosystem Experiments - Tropics” (NGEE - Tropics) desenvolvem pesquisas cujos resultados irão alimentar o modelo E3SM-FATES (em inglês, *Energy Exascale Earth System Model - Functional Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator*). O objetivo do modelo E3SM-FATES é prever com baixo grau de incerteza, o clima terrestre até o final deste século.

Dentre as pesquisas em andamento, encontra-se o presente estudo, onde o objetivo geral foi de investigar a dinâmica do efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco em função do espectro de densidade da madeira de diversas espécies em uma floresta de terra firme na Amazônia Central. Para isso, as seguintes perguntas foram norteadoras: a) Existe um padrão do efluxo de CO<sub>2</sub> em função da densidade da madeira? b) A sazonalidade influencia nas taxas de efluxo de CO<sub>2</sub>? c) Existe uma correlação entre o efluxo de CO<sub>2</sub> e a velocidade do fluxo de seiva, o teor de água superficial no solo e a temperatura do tronco? d) Qual a relação do espectro de densidade da madeira e das características dendrométricas (Altura total, diâmetro da copa, diâmetro a altura do peito (DAP) e Incremento Periódico Anual (IPA)) nas taxas de efluxo de CO<sub>2</sub>?

Para este estudo, as pesquisas relacionadas ao efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco foram realizadas na Estação Experimental de Silvicultura Tropical do Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (E.E.S.T./INPA), núcleo ZF2, na região de Manaus. Foi utilizado um sistema portátil de respiração do caule para quantificar o efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco. Os métodos foram aplicados em uma área manejada experimentalmente, com parcelas permanentes (Bionte). Essas parcelas estão bem caracterizadas com informações botânicas, do solo, da dinâmica do

ecossistema e com dados fisiológicos que estão sendo produzidos pelo projeto NGEE – Tropics em parceria com o Laboratório de Manejo Florestal (LMF) do INPA.



## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 A floresta amazônica e a mudança do clima**

As florestas tropicais ocupam papel determinante nas discussões em pautas científicas e na política mundial. São ponderadas a relação destas florestas com mudança do clima, devido ao impacto gerado pelo desmatamento na emissão dos gases de efeitos estufa (GEEs), principalmente o gás dióxido de carbônico (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>) gerados da queima das árvores ou da decomposição de árvores que são deixadas na área desmatada (Fearnside, 2008).

Estudos já têm demonstrado que as florestas tropicais podem deixar de ser sumidouros de carbonos globais e se tornarem emissores de vastas quantidades de carbono (Gatti et al., 2021), isso devido a fatores como ao crescimento nas taxas de desmatamento e a mudança climática, que tem provocado aumento da temperatura global e períodos de secas mais severos.

Alguns modelos preveem um aumento significativo na mortalidade de árvores e redução da fotossíntese na floresta amazônica nas próximas décadas, em caso de um cenário sem mitigação da emissão dos GEEs e consequente aumento das temperaturas e dos eventos de seca, afetando a estrutura e a dinâmica da floresta (White e Cannell, 1997; Cox et al., 2000, 2004; McDowell et al., 2008;).

### **2.2 Ciclo do carbono**

Nos diferentes ecossistemas existe uma constante ciclagem de elementos e materiais, sendo geralmente em vias circulares que passam pela biosfera para a geosfera, hidrosfera e atmosfera, e são chamados de ciclos biogeoquímicos. Os principais ciclos estudados são os ciclos da água, oxigênio, fósforo, nitrogênio e do carbono. O carbono é considerado a base para a vida na Terra, sendo o principal elemento químico constituinte da matéria orgânica, presente em massas fluidas (atmosfera e oceano) e nas massas sólidas (rochas e solos). É um elemento tetravalente, ou seja, pode formar quatro ligações químicas e com facilidade para diferentes combinações, o que permite a formação de moléculas

complexas. Por exemplo, estima-se que existam cerca de 10 milhões de compostos de carbono (Fryhle e Snyder, 2022).

O balanço do ciclo do carbono é fortemente influenciado pelo clima, sendo que as mudanças ambientais interferem na absorção e nos estoques de carbono globais (Copertino et al., 2019). O impacto dos eventos extremos causados por incêndios florestais, secas severas e o aumento da temperatura afetam o ciclo do carbono (por exemplo, alterando o processo fotossintético e a respiração do ecossistema provocadas em resposta ao aumento da temperatura e a limitação da umidade do solo) (Reichstein et al., 2013). Logo, mudanças em menores escalas espaciais e em diferentes graus de severidade podem reduzir a capacidade das florestas em atuar como sumidouros de carbono (Gatti et al., 2021), conseqüentemente afetando o aquecimento global.

A abordagem focada no estudo do ciclo do carbono surgiu baseada nos estudos da ecologia dos ecossistemas, que se concentra na quantificação física dos fluxos de energia e matéria (carbono, nutrientes e água) e na função dos processos fisiológicos no desenvolvimento e persistência destes compostos nos ecossistemas (Hagen, 1992; Chapin et al., 2002). O avanço desses estudos aconteceu nos anos 60 e 70, sendo um desses estudos o conduzido por Kira (1978), onde foram fornecidos os detalhes necessários para a quantificação da produtividade primária líquida (PPL) e da respiração autotrófica. No entanto, um desafio atual é o relacionado à escala, ou seja, como as medições dos fluxos nos componentes individuais (árvores) podem ser extrapolados para o povoamento florestal, principalmente em ambientes tropicais (Malhi, 2012).

Atualmente as abordagens baseadas nos fluxos são capazes de fornecer informações sobre como o metabolismo e a produtividade podem ser afetados pela variação da temperatura, umidade e da luz, em diferentes escalas temporais que podem variar de minutos a anos (Malhi, 2012). No entanto, para que sejam feitas abordagens capazes de separar os diferentes componentes internos e mecânicos do ciclo de carbono, principalmente em ambientes tão dinâmicos, como as florestas tropicais, é necessário por exemplo a coleta de dados em diferentes sítios para compreender a variação no funcionamento das florestas em diferentes gradientes ambientais (Chambers et al., 2004).

## 2.3 Respiração autotrófica

A fotossíntese e a respiração são os principais processos fisiológicos em plantas. Apenas 30-50% da fotossíntese (produção primária bruta, PPB) é usada para a construção de folhas, madeira e tecidos de raiz, enquanto o restante retorna para a atmosfera pela respiração autotrófica (Litton et al., 2007). O processo respiratório acontece na mitocôndria, que combina a produção de adenosina trifosfato (ATP), redutores equivalentes (NADH) e esqueletos de carbono, que são utilizados para a biossíntese de novas células e tecidos, para o transporte nas membranas celulares e para a manutenção, sendo este mecanismo que gera CO<sub>2</sub> para a atmosfera (Atkin, 2003).

A respiração do ecossistema acontece nos componentes que estão no solo, nas raízes e acima do solo. A respiração heterotrófica acontece no solo principalmente pela decomposição de serapilheira, e a respiração autotrófica ocorre nas diferentes partes da planta, como as folhas, nos tecidos lenhosos (tronco, galhos finos e grossos) e na raiz. Dentro dos diferentes ciclos metabólicos, a respiração aeróbica acontece em etapas, sendo as principais: a glicólise, onde acontece a formação do Acetil-CoA. No ciclo de Krebs o Acetil-CoA entra no ciclo e é reduzido (ganho de elétrons) a CO<sub>2</sub> e a cadeia transportadora de elétrons, onde ocorre a fosforilação oxidativa que resulta na produção de adenosina trifosfato (ATP) que irá propiciar energia para os processos metabólicos das células da planta (Taiz e Zeiger, 2017).

A respiração do tecido lenhoso (Ra), que é o foco deste estudo, pode ser dividida de acordo com a sua funcionalidade (Lambers, 1985). A respiração de manutenção (Rm) está associada com a renovação de proteínas e a concentrações de íons e gradientes. A respiração de manutenção inclui a respiração de perda (Rp), onde o carbono (C) é reutilizado por caminhos metabólicos alternativos da respiração, sendo o restante de C acumulado via fotossíntese liberado para a atmosfera. Além da respiração de manutenção, existe a respiração de crescimento (Rc) que é usada na síntese de novos compostos estruturais da matéria seca (Thornley e Cannell, 2000).

## 2.4 O efluxo de CO<sub>2</sub> na superfície do tronco

A variável do efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco ( $E_A$ ) para a atmosfera é uma importante variável para o entendimento dos mecanismos fisiológicos da planta. Sua importância se remete aos processos da própria respiração e da transpiração. No entanto não se deve utilizar a variável  $E_A$  para atribuir a “taxa de respiração do tronco”, pois existe uma subestimação nessa conversão, uma vez que o CO<sub>2</sub> gerado como subproduto da respiração não é integralmente emitido via efluxo de CO<sub>2</sub> pelo tronco, pois parte dele é transportado via xilema na forma de ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), e além disso, parte do CO<sub>2</sub> pode ser armazenado dentro do caule (Angert et al., 2012). Logo, para quantificação da respiração total do tronco, é necessário quantificar o carbono que é gerado pelo processo da respiração e fica armazenado na planta e o ácido carbônico que é transportado via xilema para outras partes da planta.

O transporte interno de CO<sub>2</sub> tem seu funcionamento regulado por diferentes condições tais como: temperatura, velocidade do fluxo de seiva e o pH, que afetam a solubilização do CO<sub>2</sub> no xilema (Teskey e Mcguire, 2008). Um dos métodos para avaliar o transporte de CO<sub>2</sub> dissolvido na seiva da planta é utilizando a técnica de carbono marcado (<sup>13</sup>C). Um dos estudos desenvolvido por Bloemen et al. (2013) verificou que parte do CO<sub>2</sub> dissolvido é oriundo das raízes sendo posteriormente transportado pelos vasos internos (fluxo interno) até o tronco das árvores. Outro estudo verificou que parte do CO<sub>2</sub> oriundo das raízes pode ser transportado até as folhas e emitido para a atmosfera por difusão foliar (Teskey e Mcguire, 2008). Logo, estudos anteriores buscaram compreender os mecanismos de como acontece o armazenamento e o transporte de CO<sub>2</sub> para avaliar a dinâmica do CO<sub>2</sub> nos diferentes componentes da planta (Angert et al., 2012; Kaldenhoff, 2012; Teskey, 2008).

Para as medidas do efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco, muitos estudos têm buscado relacionar as taxas emitidas com as variáveis ambientais e as condições futuras de mudança do clima. A sensibilidade climática tem se mostrado um fator determinante para o efluxo de CO<sub>2</sub> onde, por exemplo, em condições de seca as taxas de emissão de CO<sub>2</sub> pelo tronco diminuiriam 27% quando comparada a estação chuvosa, no entanto, a seca aumentou a proporção das taxas de

respiração de manutenção em relação às taxas de respiração de crescimento (Rowland et al., 2018). Em cenários futuros com secas mais severas e recorrentes o aumento da demanda da respiração de manutenção das árvores pode ser um indicativo da reversão das florestas tropicais como sumidouros de carbono. Contudo, ainda permanecem algumas incertezas das estimativas dos fluxos do CO<sub>2</sub> e das respostas das emissões de CO<sub>2</sub> pelo tronco de florestas megadiversas como as da Amazônia.

## **2.5 Fisiologia do tronco e a densidade da madeira**

A relação da densidade da madeira com as atividades fisiológicas das árvores é um parâmetro que deve ser levado em consideração. Pois os fatores relacionados às diferentes estratégias de desenvolvimento das plantas, estão interligados com os diferentes grupos de densidade da madeira. As células que são formadas no lenho são derivadas da divisão de células cambiais, sendo este processo dependente de uma combinação complexa de processos interativos regulados por fatores genéticos, regulação hormonal, ontogênese e pelas condições ambientais. (Fonti e Jansen, 2012; Aloni, 2013).

A madeira é composta por carbono, hidrogênio e oxigênio e sua parte química é formada por celulose, hemicelulose e lignina. A estrutura interna da madeira é dividida em câmbio, floema e xilema e são nestas diferentes regiões que ocorrem os processos metabólicos e fisiológicos. A variação da área de xilema ativo (alburno) é um fator determinante para a demanda energética, dependendo do estágio de desenvolvimento da planta. Sendo estas atividades do tronco e em outras partes da árvore relacionadas com a estratégia ecológica da planta (Shimoyama e Barrichello, 1989).

As diferentes estratégias de crescimento estão relacionadas aos traços funcionais e a sua interação com os fatores bióticos e abióticos (Schlickmann et al., 2019). Para a densidade da madeira, plantas que têm crescimento mais rápido tendem a ter madeira mais leve, e conseqüente são espécies de baixa densidade, o contrário para as espécies com alta densidade da madeira (Shimoyama e Barrichello, 1989). No estudo feito por Fajardo e Laughlin (2023), os autores concluíram que a densidade da madeira pode ser um traço funcional indicador da estratégia ecológica de árvores lenhosas e que previu com sucesso, juntamente com a área foliar, as taxas de crescimento das espécies.

### **3. OBJETIVOS**

#### **Objetivo geral**

Investigar a dinâmica sazonal (período seco e chuvoso) do efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco em função do espectro de densidade da madeira em uma floresta de terra firme na Amazônia Central.

#### **Objetivos específicos**

- Comparar o efluxo de CO<sub>2</sub> do tronco de espécies com diferentes densidades da madeira em períodos distintos de precipitação;
- Correlacionar o efluxo de CO<sub>2</sub> do tronco com a velocidade do fluxo de seiva, teor de água superficial no solo e a temperatura do tronco nos diferentes grupos de densidade da madeira;
- Correlacionar o efluxo de CO<sub>2</sub> do tronco de espécies com diferentes densidades da madeira com o Incremento periódico anual (IPA), diâmetro da copa, altura total da planta e o diâmetro na altura do peito (DAP).

#### **Hipóteses científicas**

Para responder às perguntas e atender aos objetivos propostos foram testadas as seguintes hipóteses:

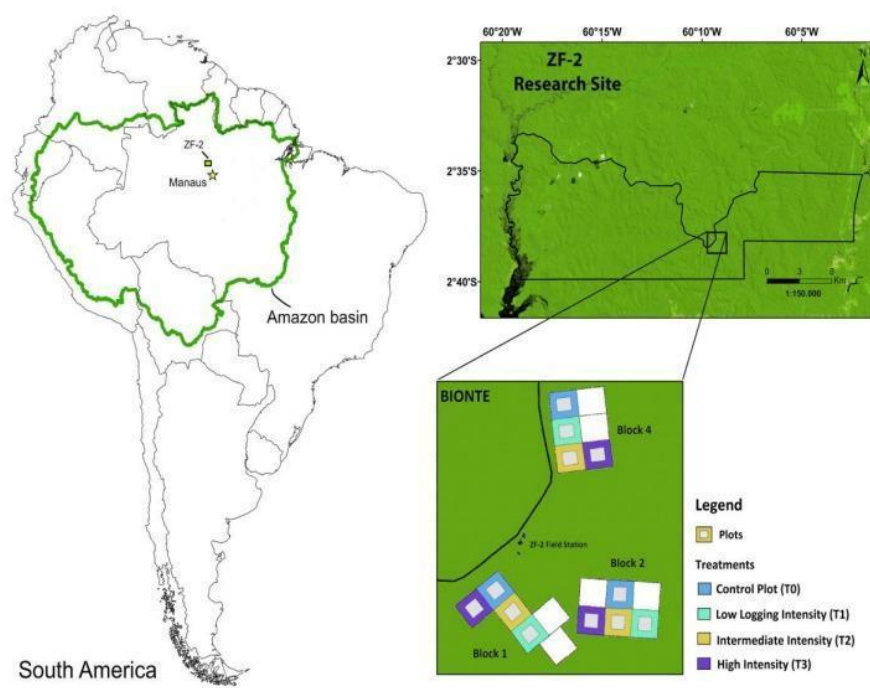
1. Variações no efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco seguem diferentes padrões de acordo com a densidade da madeira dos indivíduos e são influenciados pela sazonalidade.
2. Existe uma relação inversamente proporcional para o fluxo de seiva e a temperatura do tronco em relação ao efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco e uma correlação positiva com o teor de água superficial no solo.
3. O efluxo de CO<sub>2</sub> do tronco possui correlação significativa com o Incremento Periódico Anual (IPA), diâmetro da copa, DAP e altura total.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da área de Estudo

O estudo foi desenvolvido na Estação Experimental de Silvicultura Tropical do Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (E.E.S.T/INPA), localizada a aproximadamente 90 km de Manaus – AM (**Figura 1**), entre os km-21 e km-24 da margem esquerda da estrada vicinal ZF-2 do Distrito Agropecuário da SUFRAMA, sendo uma área destinada para os estudos de regeneração natural do projeto Manejo Ecológico e Exploração da Floresta Tropical Úmida (Bionte).

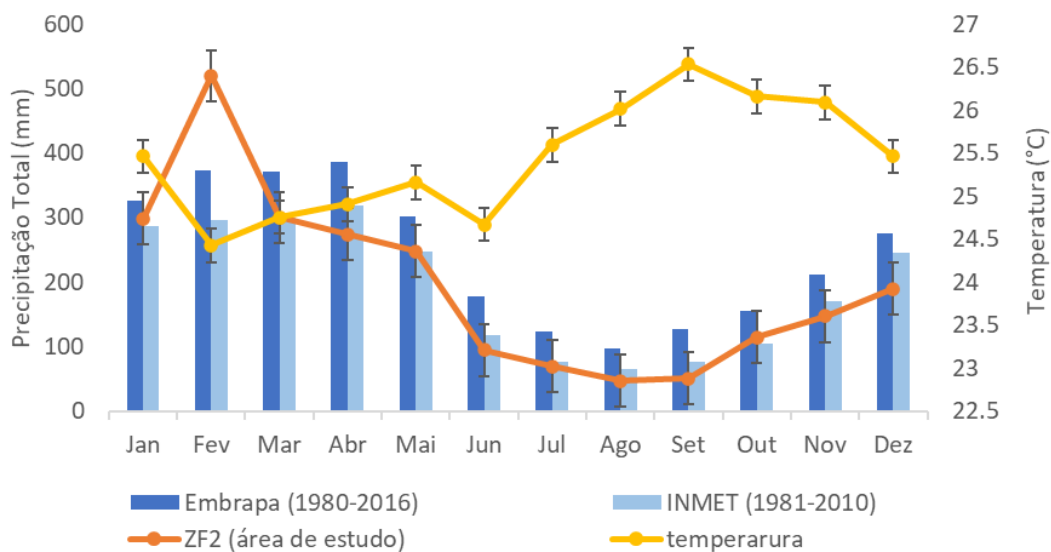
A pesquisa foi realizada nas parcelas permanentes do projeto Bionte instalado em 1985. Com área total de 72 hectares. O Bionte é composto por 3 blocos (400 m x 600 m) dispostos ao acaso numa área de platô. Em cada bloco foram instalados 6 sub-blocos de 4 hectares (200 m x 200 m) com diferentes intensidades de cortes (Higuchi et al., 1985). Os tratamentos são: T1 – exploração de 25% da área basal; T2 – exploração de 50%; T3 – exploração de 75% e T0 testemunha (sem exploração).



**Figura 1.** Localização da área de estudo (Bionte) onde esta dissertação foi desenvolvida. Fonte: Jardine *et al.*, 2022.

O clima é caracterizado como tropical chuvoso do tipo “Af”, segunda classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013), com temperatura média de 25,3°C, máxima de 31,7°C e mínima de 22,4°C. A média anual da umidade relativa do ar foi 86,3%, sendo abril o mês mais úmido (89%) e setembro o menos úmido (82,4%). A precipitação pluviométrica da série histórica 1981-2010 de 2.787 mm (**Figura 2**), segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).





**Figura 2.** Precipitação média histórica (INMET) entre os anos 1981-2010 (colunas em azul claro), Embrapa (1980-2016) para a região de Manaus (colunas em azul escuro) e a média da precipitação e da temperatura (sensor de temperatura instalado na altura de 25 metros em uma torre de monitoramento) para a ZF2 (área de estudo). Período: meses de janeiro a abril (2023) e de maio a dezembro (2022).

Segundo a descrição de Higuchi et al. (1998), a área de estudo é coberta por Floresta Tropical Úmida Densa de Terra-firme, com características típicas da região central da Amazônia. A floresta da área de estudo apresenta composição florística altamente heterogênea (Higuchi et al., 1998; Marra, 2010; Gai et al., 2013), tendo sido registradas 58 famílias botânicas e 709 espécies, das quais 51 foram identificadas ao nível de gênero e 19 somente ao nível de família, totalizando 11.335 indivíduos arbóreos (limite de inclusão de DAP  $\geq 10$  cm). As famílias mais abundantes na área do inventário florístico foram: Lechytidaceae, Euphorbiaceae, Sapotaceae e Burseraceae, sendo aproximadamente 51% do total de indivíduos registrados.

## 4.2 Aquisição de dados

### 4.2.1 Seleção das amostras

Neste estudo, foram amostrados 30 indivíduos distribuídos em 18 famílias localizadas em uma área de platô (**Tabela 1**). A coleta de dados foi realizada entre julho/2022 a outubro/2022 para o período seco e de novembro/2022 a fevereiro/2023 para o período chuvoso. O critério de seleção dos indivíduos foi baseado em indivíduos que possuem sensores de fluxo de seiva instalados, que ocupam o dossel da floresta e que apresentam uma ampla variação no espectro de densidade da madeira. Neste último quesito, os indivíduos foram divididos em três grupos de acordo com o gradiente de densidade básica da madeira:

I) Baixa densidade ( $0,3 - 0,45 \text{ g cm}^{-3}$ ), II) Média densidade ( $0,45 - 0,7 \text{ g cm}^{-3}$ ) e III) Alta densidade ( $> 0,7 \text{ g cm}^{-3}$ ).

### 4.2.2 Densidade da madeira

Foram usadas diferentes fontes integradas para compor os dados de densidade de madeira das árvores do projeto BIONTE. A principal fonte utilizada foi a de Chave e colaboradores (2006) e o banco de dados sintetizados por Ramírez-Méndez (2018) que combinaram estimativas locais de densidade de madeira e em outras fontes coletadas na Amazônia.

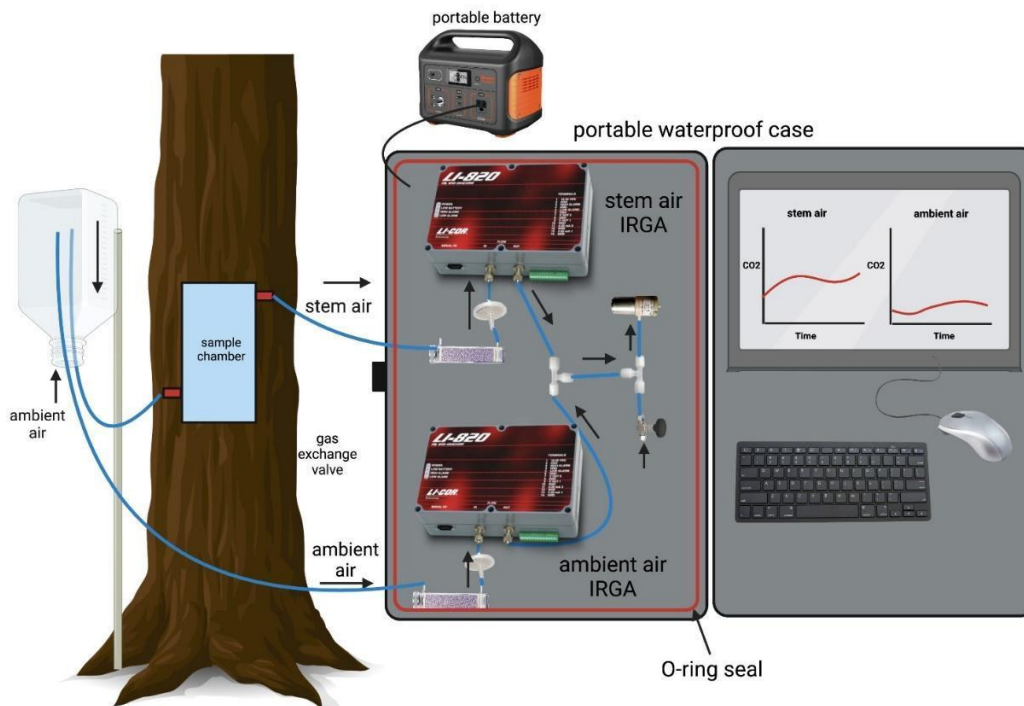
**Tabela 1.** Descrição das espécies selecionadas nos diferentes grupos de densidade da madeira, e as respectivas informações: diâmetro da copa (m), altura total (m), Incremento Periódico Anual (IPA) (cm), diâmetro na altura do peito (DAP) (cm) e densidade básica da madeira (g cm<sup>-3</sup>).

Grupo de densidade da madeira	Nome científico	Gênero	família	diâmetro da copa (m)	Altura Total (m)	IPA (cm)	DAP (cm)	Densidade da madeira (g cm <sup>-3</sup> )
Alta densidade	<i>Zygia racemosa</i>	Zygia	Fabaceae	10.97	17.6	0.38	19	0.74
	<i>Lecythis prancei</i>	Lecythis	Lecythidaceae	10.84	25.1	0.1	55.6	0.85
	<i>Lecythis zabucajo</i>	Lecythis	Lecythidaceae	6.83	21	0.03	26.4	0.86
	<i>Elizabetha durissima</i>	Elizabetha	Fabaceae	12.96	22.9	0.77	46.8	0.80
	<i>Inga paraensis</i>	Inga	Fabaceae	11.19	15	0.53	26.6	0.82
	<i>Ocotea percurrrens</i>	Ocotea	Lauraceae	10.84	18.6	0.39	61.4	0.52
	<i>Ocotea cinerea</i>	Ocotea	Lauraceae	10.7	31	0.56	44.5	0.78
	<i>Licania sandwithii</i>	Licania	Chrysobalanaceae	8.91	22.1	0.15	31.3	0.88
	<i>Andira parviflora</i>	Andira	Fabaceae	7.53	17.3	0.44	31.3	0.70
<i>Croton urucurana</i>	Croton	Euphorbiaceae	6.26	15.6	0.56	24.6	0.83	
Média densidade	<i>Endopleura uchi</i>	Endopleura	Humiriaceae	8.07	24.3	0.18	45.9	0.67
	<i>Pouteria filipes</i>	Pouteria	Sapotaceae	7.66	24.1	0.28	34.2	0.58
	<i>Protium tenuifolium</i>	Protium	Burseraceae	6.05	15.6	0.43	34	0.58
	<i>Inga spp.</i>	Inga	Fabaceae	8.51	18.8	0.65	18.9	0.58
	<i>Inga splendens</i>	Inga	Fabaceae	7.21	19	0.3	18.6	0.55
	<i>Qualea paraensis</i>	Qualea	Vochysiaceae	7.71	18.7	0.25	20	0.66
	<i>Duckeodendron cestroides</i>	Duckeodendron	Solanaceae	12.1	20	0.06	82.2	0.62
	<i>Couratari multiflora</i>	Couratari	Lecythidaceae	5.72	29.4	0.07	33.8	0.67
	<i>Miconia minutiflora</i>	Miconia	Melastomataceae	5.87	21.9	0.5	13.3	0.62
	<i>Chrysophyllum sanguinolentum</i>	Chrysophyllum	Sapotaceae	8.63	22.4	0.23	35.7	0.69
Baixa densidade	<i>Scleronema micranthum</i>	Scleronema	Malvaceae	11.19	15	0.25	39.5	0.40
	<i>Cecropia sciadophylla</i>	Cecropia	Urticaceae	10.9	18	0.55	27.5	0.41
	<i>Pourouma velutina</i>	Pourouma	Urticaceae	11.34	11.6	0.59	26.9	0.38
	<i>Annonaceae spp.</i>	Annonaceae	Annonaceae	9.91	19.9	0.62	20.1	0.38
	<i>Simarouba amara</i>	Simarouba	Simaroubaceae	9.3	18.1	0.43	25.5	0.39

	<i>Casearia spp.</i>	Casearia	Salicaceae	6.26	22.1	0.66	26.1	0.38
	<i>Micrandropsis scleroxylon</i>	Micrandropsis	Euphorbiaceae	10.84	19.8	0.34	44.6	0.38
	<i>Connarus perrottetii</i>	Connarus	Connaraceae	6.54	19.6	0.13	32.3	0.45
	<i>Tachigali cf. paraensis</i>	Tachigali	Fabaceae	8.9	25.8	0.15	27.9	0.45
	<i>Virola spp.</i>	Virola	Myristicaceae	9.8	19.7	0.37	30.8	0.45

#### 4.2.3 Efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco

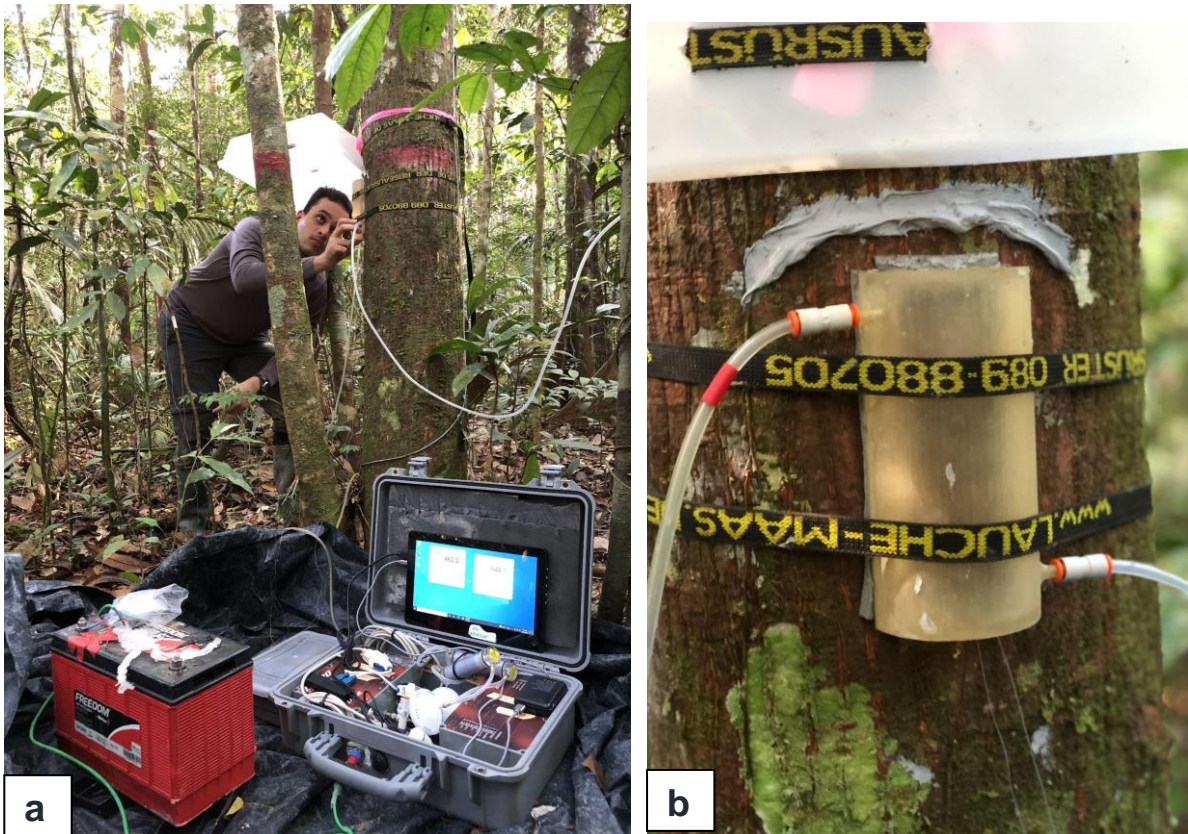
Para obter os dados de  $E_A$  ( $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) de cada um dos 30 indivíduos selecionados por este estudo, foram feitas medidas a cada 30 segundos durante 24 horas de duração para cada indivíduo entre os meses de julho/2022 a fevereiro/2023, sendo obtida posteriormente a média em intervalos de 30 minutos. Para isso, foi utilizado um sistema portátil de respiração do caule (Jardine et al., 2023) (**Figura 3**) sendo desenvolvido e aprimorado exclusivamente para esse projeto de mestrado, nas dependências do Laboratório de Lawrence Berkeley (LBNL) nos Estados Unidos e do Laboratório de Manejo Florestal do INPA.



**Figura 3.** Esquema dos componentes do sistema portátil de medidas do Efluxo de CO<sub>2</sub> instalado no tronco (para mais informações veja Jardine et al., 2023).

O sistema consiste num cilindro de teflon cortado ao meio produzido por uma impressora 3D com as dimensões de 15,3 cm de comprimento e 6,5 cm de largura e área de 0,009945 m<sup>2</sup>. No campo, a câmara de teflon foi fixada ao tronco de uma árvore, na altura de 1,3 m (referente ao DAP - diâmetro à altura do peito), por meio de cordas com fivelas de correr. Previamente à instalação da câmara

no tronco de cada indivíduo, a casca foi raspada suavemente para a retirada de líquens, cupins, cipós e musgos, e foi marcado uma área maior do que a da câmara, para que as medidas fossem tomadas sempre na mesma posição (**Figura 4**). Quando o sistema é ligado, o ar do ambiente externo (*ambient air*) entra na câmara presa ao caule, sendo posteriormente misturado ao ar contido dentro do cilindro de teflon (*stem air*) que é dirigido para um analisador de gases (IRGA- Analisador de gás infravermelho) modelo (Li-Cor 820) (**Figura 3**). O fluxo de ar ambiente é também lido por outro Li-Cor 820 (IRGA referência), recolhendo amostras de ar ambiente junto à abertura da câmara do caule. O fluxo de gás através do sistema é dirigido por uma mini-bomba motorizada de 12V CC de vácuo que é ligada a ambas as saídas dos IRGAs por uma mangueira de teflon. A bomba de vácuo é ligada a outro T, ligado à saída dos IRGAs e a uma válvula de agulha para controle do fluxo. Os IRGAs, todo o hardware informático e o sistema de vácuo estão todos alojados dentro de uma caixa *pelican* à prova de água, permitindo que o sistema seja levado para locais de campo e protegido de intempéries. O sistema respiratório de haste portátil é alimentado por uma bateria portátil de 12 V ou via tomada de 220V, advinda de fonte de energia solar instalada nos 3 blocos do experimento (**Figura 4**).



**Figura 4.** (a) Sistema portátil de respiração instalado em campo. (b) Câmara instalada no tronco.

Uma vez obtidos estes dados, o  $E_a$  ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) foi calculado com base na equação 1.

$$E_a = \frac{\Delta\text{CO}_2 F}{VtS} \quad (1)$$

Sendo  $\Delta\text{CO}_2$  a diferença entre a concentração  $[\text{CO}_2]$  no ar ambiente entre a câmara e dentro da câmara ( $\mu\text{L L}^{-1}$ );  $F$  o fluxo de ar que entram na câmara do tronco ( $\text{L min}^{-1}$ ),  $V$  o volume molar de um gás ideal ( $24 \text{ L mol}^{-1}$ ),  $t$  a conversão fator de tempo de minutos a segundos ( $1 \text{ min}/60 \text{ s}$ ), e  $S$  a área da haste superficial fechada pela câmara ( $0,009945 \text{ m}^2$ ).

#### 4.2.4 Temperatura do tronco

Para a coleta de dados de temperatura do tronco, foi utilizado um registrador de dados de temperatura com adesivos termais com base em termopar, modelo (OM-CP-OCTTEMP-A Nomad®, Omega Engineering). Os sensores foram fixados com o uso de fita microporosa ao lado da câmara de respiração na superfície do tronco. O sistema foi programado para fazer medidas a cada 30 segundos e foi feita a média destas observações a cada 30 minutos.

#### 4.2.5 Velocidade de seiva xilemática

Para o cálculo da velocidade de seiva xilemática ( $v_s$ ) de cada um dos 30 indivíduos foram medidos os padrões radiais de  $v_s$  utilizando sensores do tipo Granier previamente instalados na área de estudo e com uma ponta sensora de 2 cm de profundidade (TDP-GS, PlantSensors, Austrália; Granier, 1987). Para cada árvore, as sondas foram instaladas a 1,3 m de altura do solo e em profundidades de 2 cm dentro do alburno (Meinzer et al., 2001) (**Figura 5**). Cada sensor consiste de um conjunto de duas sondas de temperatura inseridas em tubos de cobre que protegem e proporcionam uma boa condução com o entorno do xilema. As duas sondas foram separadas por uma distância vertical de 10-15 cm. A sonda superior é continuamente aquecida com 0,2 W, enquanto a sonda inferior é usada como temperatura de referência. A diferença de temperatura (ou tensão) entre as duas sondas é então usada para calcular a velocidade do fluxo de seiva (Oishi et al., 2016) conforme a equação 2.

$$v_s = aK^b \quad (2)$$

Sendo  $v_s$  a velocidade da seiva ( $\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $a$  um coeficiente de calibração empírico (0,0119),  $b$  uma constante (1,23), e  $K$  a diferença de temperatura entre os dois sensores.

Além disso, para este estudo, assumimos que o coeficiente de calibração era adequado para nossas árvores. Por outro lado,  $K$  é calculado segundo a equação 3 abaixo:



$$K = \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T} - 1 \quad (3)$$

Sendo  $\Delta T$  a diferença de temperatura entre a sonda aquecida e não aquecida, e  $\Delta T_{max}$  é a diferença de temperatura entre as duas sondas com fluxo zero que se supõe ser alcançada em noites com baixo VPD e formação de orvalho na folhagem.



**Figura 5.** Exemplo de sensor de fluxo de seiva instalado em indivíduos do projeto Bionte.

#### 4.2.6 Incremento diamétrico

O incremento periódico anual (IPA) dos indivíduos foi obtido da base de dados do inventário florestal contínuo do projeto Bionte. As medidas de DAP foram obtidas por meio das medições ocorridas entre o período de 2000 a 2022 (22 anos). Sendo representado pela seguinte equação:

$$IPA = \frac{Y_2 - Y_1}{t}$$

Onde  $Y_2$  é a medida do DAP no ano final,  $Y_1$  a medida do DAP no primeiro ano de medição e  $t$  o intervalo de tempo.

#### 4.2.7 Diâmetro à altura do peito (DAP), Diâmetro da copa e altura total

Foi medido o diâmetro à altura do peito (DAP) com fita diamétrica, a altura total (h) foi obtida com o auxílio de um hipsômetro Haglof Vertex laser, em seguida foram medidos os quatro raios de copa a partir do eixo central da árvore, ao nível do DAP, na direção dos pontos cardeais: norte (N), leste (L), sul (S) e oeste (O), após foi feita a média aritmética para obtenção do diâmetro da copa. Foi utilizada uma bússola para orientar adequadamente a direção de cada posição cardinal. Os raios de copa foram mensurados por uma única pessoa, rejeitando-se possíveis tendências de medição por outros operadores.

#### 4.2.8 Teor de água superficial no solo

Os dados de teor de água superficial no solo foram adquiridos por meio de 3 sensores volumétricos de conteúdo de água, instalados nos 3 blocos do experimento, modelo CS655 (Campbell Scientific, Inc), ligados a datalogger CR1000x (Campbell Sci, INC) com coletas a cada 30 segundos, em diferentes profundidades.

Neste estudo, foram utilizadas as medições das profundidades de 0,05 e 0,10 cm com média feita a cada 30 minutos.

### 4.3 Análises estatísticas

As análises foram realizadas no software R versão 4.2.3 para Windows (R Development Core Team, 2023) e no software Igor Pro versão 8.0. Foi feito o teste de distribuição normal dos dados Shapiro-wilk, que comprovou a normalidade dos dados. Para atender os objetivos foram realizadas as seguintes análises:

*I) Para responder o objetivo 1: Análise descritiva e o teste de comparação de médias (ANOVA)*

Foi feita a descrição das variáveis para os dois períodos de coleta nos diferentes grupos de densidade da madeira (alta, média e baixa).

Para o teste de comparação de médias (ANOVA) foram testadas as seguintes hipóteses: H0: Não há diferença no efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco entre os diferentes grupos de densidade da madeira (alta, média e baixa), ou seja, a média do efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco é igual para a média das espécies de alta densidade ( $\mu_1$ ), média das de média densidade ( $\mu_2$ ) e média das de baixa densidade ( $\mu_3$ ). H1: Existe diferença no efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco entre os diferentes grupos de densidade da madeira (alta, média e baixa) ou seja, a média do efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco de pelo menos um dos grupos de densidade da madeira se difere.

Outra ANOVA foi feita para a comparação de médias do período chuvoso e seco. Onde foram testadas as seguintes hipóteses: H0: Não há diferença no efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco para os diferentes grupos de densidade da madeira, entre o período chuvoso e o seco, ou seja, a média do efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco é igual no período chuvoso ( $\mu_1$ ) e no período seco ( $\mu_2$ ). H1: Existe diferença no efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco para os diferentes grupos de densidade da madeira, entre o período chuvoso e o seco.

*(II) Para responder o objetivo 2: Teste de correlação de Pearson*

Foi feito um teste de correlação linear (Pearson) para detectar correlações significativas entre as variáveis: Efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco com a temperatura do

tronco, teor de água superficial no solo e a velocidade do fluxo de seiva nos diferentes grupos de densidade da madeira.

*(III) Para responder o objetivo 3: Correlação entre o efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco e as variáveis coletadas*

Assim como para o objetivo 2, no objetivo 3 foi feito um teste de correlação de pearson para detectar se existem correlações significativas.

Esta mediu a afinidade entre 2 variáveis, indicando o comportamento de uma em relação a outra, podendo variar de -1 a +1. Valores positivos indicam relação diretamente proporcional entre as variáveis e valores negativos indicam relação inversamente proporcional. Quanto mais próximos de 1 ou -1, mais forte é a correlação.

Foram feitas as seguintes correlações:

- Efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco (Ea) e Incremento periódico anual (IPA);
- Efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco (Ea) e diâmetro da copa;
- Efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco (Ea) e DAP;
- Efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco (Ea) e altura.

#### *Inferências estatísticas*

As inferências estatísticas deste projeto foram feitas de acordo com a tabela de escala de probabilidade do IPCC (2010) (**Tabela 2**).

**Tabela 2.** Escala de probabilidade (IPCC)

<b>Termo</b>	<b>Probabilidade</b>
Virtualmente diferente	99-100%
Muito provável	90-99%
Provável	66-90%
Improvável	33-66%
Muito improvável	10-33%
Excepcionalmente improvável	1-10%

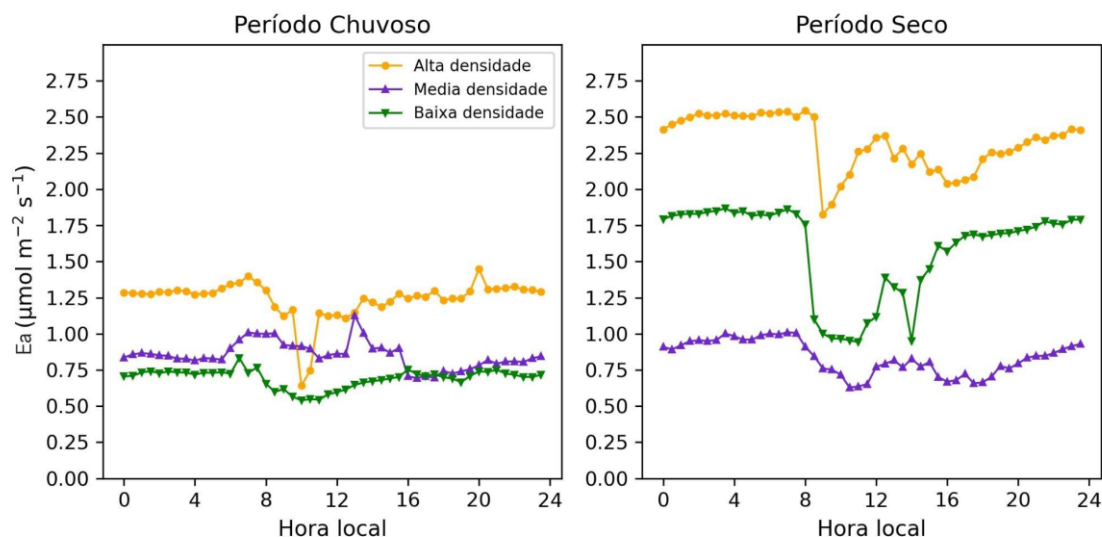
Fonte: IPCC (2010)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Quantificação do efluxo de CO<sub>2</sub> na superfície do tronco em função da densidade da madeira no período chuvoso e seco

No sistema portátil de coleta de dados em modo dinâmico, as coletas foram feitas de modo contínuo em experimentos de 24 horas de duração. Neste modelo, foi possível demonstrar graficamente as diferenças no comportamento das variáveis estudadas entre as horas do dia e da noite e em dois períodos distintos de precipitação (seco e chuvoso). No geral, os maiores valores do efluxo de CO<sub>2</sub> da superfície do tronco (Ea) foram encontrados para as espécies com alta densidade da madeira nos dois períodos. Já entre os dois períodos sazonais, a estação seca apresentou as maiores taxas de Ea.

Em relação aos resultados das 24 horas de coleta (dia e noite), em média os valores para o efluxo de CO<sub>2</sub> na superfície do tronco (Ea) foram maiores apenas durante a noite no período seco (**Figura 6**).



**Figura 6.** Padrão diário da variável Ea ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) em função do espectro de densidade da madeira nos períodos chuvoso e seco, apresentando maiores valores para as espécies com alta densidade da madeira nos dois períodos sendo as maiores taxas no período seco.

Houve um aumento das taxas do efluxo de CO<sub>2</sub> no período seco (52,6% - alta densidade; 43,5% baixa densidade) em relação ao período chuvoso. Este resultado difere do que foi encontrado em estudo de florestas temperadas (Saveyn et al., 2007; Rodryguez-Calcerrada et al., 2014), em que ocorreu uma diminuição do efluxo de CO<sub>2</sub> no período seco. Porém, para florestas tropicais o aumento da respiração em períodos de seca foi também encontrado por outros estudos (Miranda et al., 2005; Varone e Gratani, 2005; Rowland et al., 2018).

As maiores taxas de Ea também foram maiores para as espécies com alta densidade da madeira, tanto no período seco (1,68 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> - baixa densidade; 0,76 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> - média densidade e 2,38 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> - alta densidade), como no período chuvoso (0,73 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> - baixa densidade; 0,74 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> - média densidade e 1,26 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> - alta densidade) (**Figura 7**). Em um estudo feito em florestas tropicais o aumento do efluxo de CO<sub>2</sub> pelo tronco foi 27% superior no experimento de seca em relação ao período chuvoso (Rowland et al., 2018).

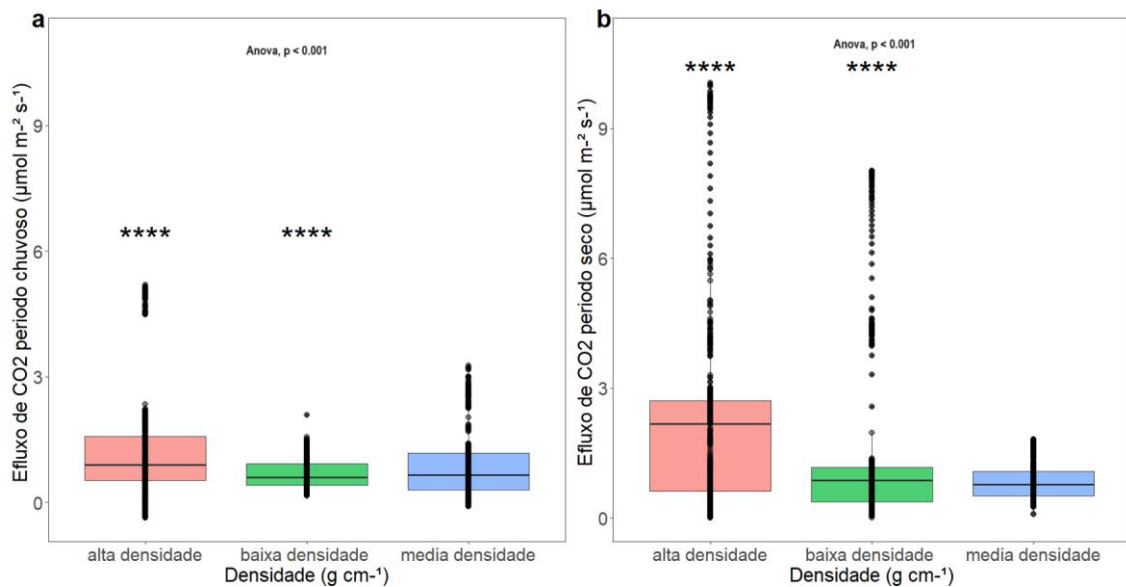
Em comparação com outros estudos realizados para a florestas tropicais (**Tabela 3**) é possível verificar uma proximidade dos valores encontrados por Rowland e colaboradores (2018) e por Zach e colaboradores (2010) maiores taxas médias de Efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco no período seco. Este comportamento evidencia o aumento do Efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco durante o período seco para as florestas tropicais, o que deve estar relacionado com as condições ambientais e a variação destas nos dois períodos sazonais.

**Tabela 3.** Comparação entre estudos feitos avaliando o Efluxo de CO<sub>2</sub> em florestas tropicais.

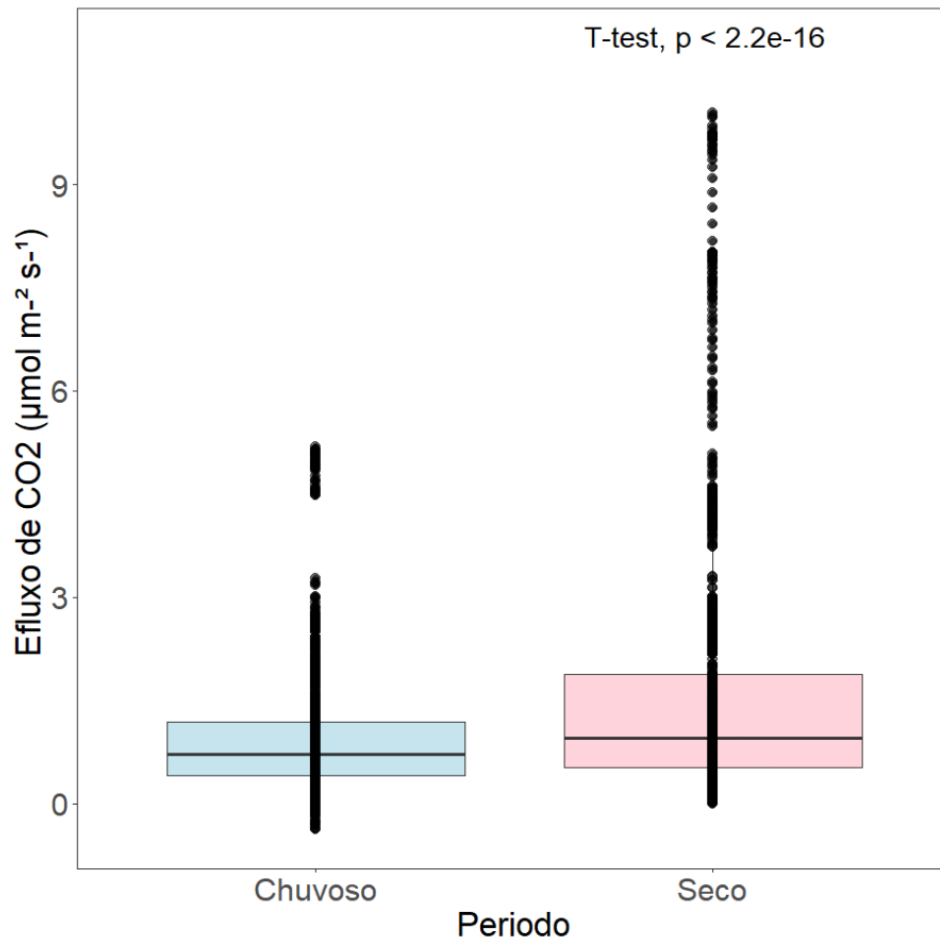
Local do estudo	Efluxo de CO <sub>2</sub> no tronco médio no período chuvoso (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Efluxo de CO <sub>2</sub> no tronco médio no período seco (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Referências
Floresta Nacional de Caxiuã, no leste da Amazônia	1,01 ± 0,08	0,87 ± 0,07	Rowland et al., 2018
Floresta tropical, região sul do Equador	0,07 e 0,64	0,18 até 1,34	Zach et al., 2010
Floresta amazônica, Central	0,93 ± 0,04	1,61 ± 0,09	Borges (2024)

Neste estudo em que foram divididos nos grupos de densidade da madeira, maiores valores foram encontrados para as espécies de alta

densidade, que podem estar relacionados com a ontogênese dos indivíduos avaliados. Um dos critérios de seleção amostral, foram indivíduos de diferentes grupos de densidade da madeira que ocupassem o dossel da floresta em uma área de manejo florestal com exploração feita a mais de 35 anos, neste sentido as espécies de baixa densidade, que possuem estratégias de crescimento mais rápido e ciclo de vida mais curto (Budowski, 1965; Swaine e Whitmore, 1988) no momento deste estudo podem estar em um estágio final de desenvolvimento. No entanto, as espécies do grupo de alta densidade da madeira, que possuem crescimento mais lento e ciclo de vida mais longo (Budowski, 1965; Swaine e Whitmore, 1988), podem ter maior demanda energética para o crescimento e desenvolvimento no período avaliado. O estágio sucessional da floresta tem impactos substanciais na produtividade e na biomassa, para florestas que sofreram algum distúrbio, e estão estágios sucessionais iniciais ou intermediários, apresentam maior produtividade (Rödig et al., 2018)



**Figura 7.** Box plots com a comparação de médias (ANOVA) da variável  $E_a$  ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) em função do espectro de densidade da madeira nos períodos chuvoso (a) e seco (b), assumindo maiores valores para as espécies com alta densidade da madeira nos dois períodos sendo as maiores taxas no período seco. P valor com significância ( $p < 0,01$ ).



**Figura 8.** Comparação do Efluxo de CO<sub>2</sub> (μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) no período chuvoso e seco, assumindo maiores valores no período seco.

O aumento do efluxo de CO<sub>2</sub> no período seco (**Figura 8**) pode estar relacionado com o aumento da respiração de manutenção (R<sub>m</sub>). Estima-se que a respiração de manutenção (R<sub>m</sub>) é 80% da respiração total de árvores maduras em florestas tropicais (Ryan et al., 1994; Meir e Grace, 2002). No entanto, estudos recentes mostraram que a relação da respiração de manutenção (R<sub>m</sub>) e a respiração de crescimento (R<sub>c</sub>) pode variar de acordo com as condições de seca nas regiões tropicais (Rowland et al., 2018).

No período de seca em que a taxa do efluxo de CO<sub>2</sub> foi superior ( $1,61 \pm 0,09 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) ( $P > 0,01$ ) se comparada ao período chuvoso ( $0,93 \pm 0,04 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) ( $P > 0,01$ ), é possível sugerir um aumento da R<sub>m</sub> visto a demanda para reparar danos hidráulicos devido ao estresse hídrico, com o aumento do custo para reparação de células do tecido xilemático que foram danificadas pela seca, impossibilitando o investimento de carboidratos para a respiração de



crescimento ( $R_c$ ) (Mcdowell e Allen, 2015; Rowland et al., 2015; Rowland et al., 2018).

No entanto, quando foram comparadas as curvas de velocidade do fluxo de seiva e a teor de água superficial no solo para o período chuvoso e seco, não houve diferença significativa para os dois períodos ( $P > 0,001$ ), ou seja, não houve uma diminuição significativa na disponibilidade hídrica para as espécies, mesmo com a variação sazonal.

Um possível paralelo pode ser feito com um estudo de Wu e colaboradores (2016) que evidenciou um aumento aproximado de 27% da taxa fotossintética, em quatro regiões da floresta amazônica, no período seco, relacionado com a fenologia da floresta, aumentando a queda de folhas maduras e o investimento em folhas novas para melhor eficiência no uso da luz, devido à maior disponibilidade luminosa no período seco.

Logo o aumento no efluxo de  $CO_2$  no período seco, pode estar relacionado com a disponibilidade hídrica que foi a mesma nos dois períodos e possivelmente com a provável maior disponibilidade de luz no período seco (Wu et al., 2016), sugerindo o aumento da respiração, refletindo no maior efluxo de  $CO_2$  no período seco.

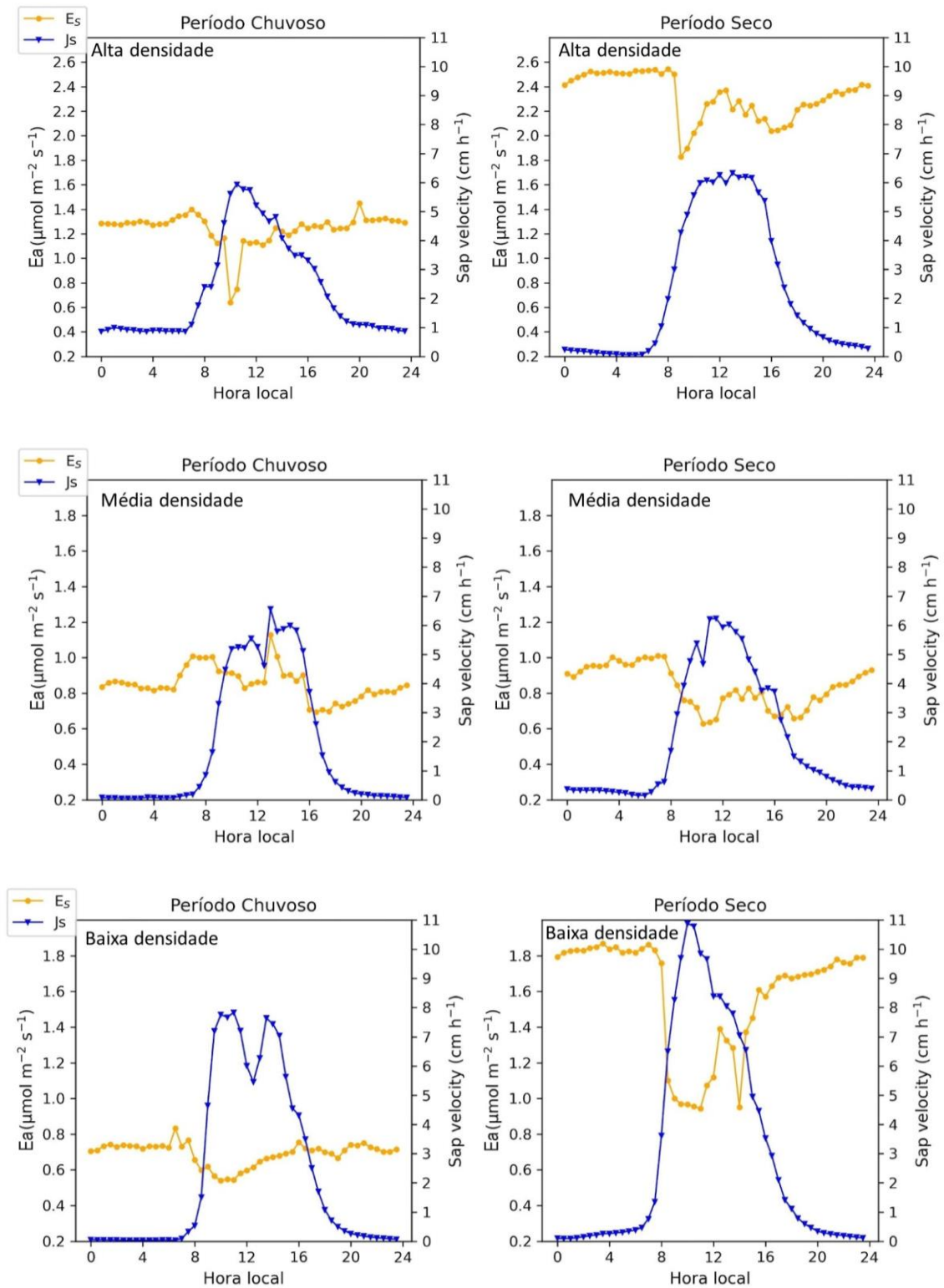
## **5.2 Relação do efluxo de $CO_2$ com a variável da velocidade do fluxo de seiva e o teor de água superficial no solo.**

Para a variável velocidade do fluxo de seiva, os valores não apresentaram variação significativa entre o período chuvoso e seco. Para a velocidade do fluxo de seiva, os valores para as espécies de alta densidade foram de (0 a 6  $cm\ hr^{-1}$ ), para as de média densidade (0 a 6,5  $cm\ hr^{-1}$ ) nos dois períodos sazonais e para as de baixa densidade (0 a 8  $cm\ hr^{-1}$ ) no período chuvoso e de (0 a 11  $cm\ hr^{-1}$ ) no período seco (**Figura 9**). Os valores não apresentaram diferença significativa ( $P > 0,001$ ) entre o período chuvoso e seco.

Ao se avaliar o efluxo de  $CO_2$  relacionado com a variável da velocidade do fluxo de seiva resultou em relações inversas para os grupos de alta e média densidade no período chuvoso e para as de baixa densidade no período seco (**Figura 9**). Sendo os valores de alta ( $R = -0,12$ ;  $P < 0,001$ ) média ( $R = -0,38$ ;

$P < 0,001$ ) e baixa densidade da madeira ( $R = -0,017$ ;  $P = 0,705$ ) no período chuvoso e alta ( $R = -0,07$ ;  $P = 0,740$ ) média ( $R = -0,015$ ;  $P = 0,740$ ) e baixa densidade da madeira ( $R = -0,15$ ;  $P < 0,001$ ) no período seco.

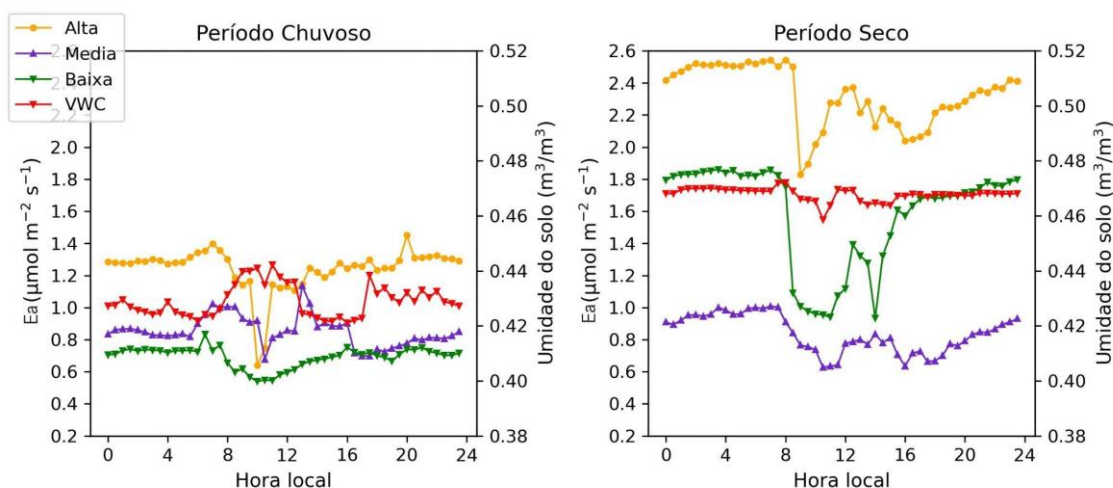
Estes resultados também foram confirmados em outros trabalhos, que validaram a relação inversa entre a variável  $E_a$  e a velocidade do fluxo de seiva (Teskey e McGuire, 2002). Em um estudo realizado em florestas tropicais, foi observado que à medida que a velocidade do fluxo de seiva aumentava, a taxa de efluxo de  $CO_2$  pelo tronco diminuía, reforçando os resultados deste estudo (Jardine et al., 2022).



**Figura 9.** Padrão da variável  $E_a$  ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) correlacionados com a velocidade do fluxo de seiva ( $\text{cm hr}^{-1}$ ) para as espécies de alta, média e baixa densidade da madeira, no período chuvoso e seco.

Os valores de efluxo de CO<sub>2</sub> emitidos pela superfície do tronco podem variar de acordo com alguns fatores, como pH, temperatura, sazonalidade e a velocidade do fluxo de seiva, sendo que uma porção do CO<sub>2</sub> resultante da respiração permanece dentro da árvore e outra parte substancial pode estar dissolvida na seiva do xilema, sendo transportado para outras partes da planta (Teskey e McGuire, 2002, Bowman et al., 2005; Angert et al., 2012; Rowland et al., 2018).

Foi encontrada uma correlação positiva, para os dados gerais, entre o teor de água superficial do solo (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) e o efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco (μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), (**Figura 10**) estes valores foram divididos nos grupos de densidade da madeira, sendo de (R= 0,31; P<0,001) para as espécies de alta densidade da madeira, (R= 0,21; P<0,001) para média e (R= 0,41; P<0,001) para baixa no período chuvoso. No período seco os valores encontrados foram de (R= 0,42; P<0,001) para alta densidade da madeira, (R= 0,51; P<0,001) para média e (R= 0,53; P<0,001) para as espécies de baixa densidade. Também foi encontrada uma correlação positiva entre o efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco e o teor de água superficial no solo, para uma floresta de terra firme na Amazônia (Stahl, 2011).



**Figura 10.** Gráfico dos valores de efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco (μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) correlacionados com o teor de água superficial no solo (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>).

Os valores médios encontrados para o teor de água superficial no solo, foram de 0,44 ± 0,003 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> no período chuvoso e 0,46 ± 0,04 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> no período seco. Estes valores não apresentaram diferenças significativas entre os dois períodos sazonais (p>0,001). Em um estudo feito por Schaik e colaboradores

(2018), avaliando eventos de seca (El nino), foi evidenciado que o baixo teor de água no solo, pode afetar significativamente a produção primária bruta da floresta amazônica.

A relação dos valores de teor de água superficial no solo, para condições de seca, mostraram uma diminuição na taxa do efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco, os valores médios encontrados em uma floresta de terra firme na amazônia foram de 0,37 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> para o período chuvoso e de 0,22 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> no período seco (Stahl, 2011). No entanto, no nosso estudo não houve diminuição no teor de água superficial no solo, mesmo no período seco, o que refletiu em maior efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco no período seco, que pode ser consequência da dependência da variável Ea com a disponibilidade de água no solo, não refletindo no aumento das taxas da respiração de manutenção, devido a menor necessidade de reparação dos danos hidráulicos, porém possivelmente maior taxa de respiração de crescimento, visto a disponibilidade de água e a maiores temperaturas e irradiância, que são mais características do período seco nas florestas tropicais. (Wu et al., 2016).

### 5.3 O efluxo de CO<sub>2</sub>, e a temperatura do tronco

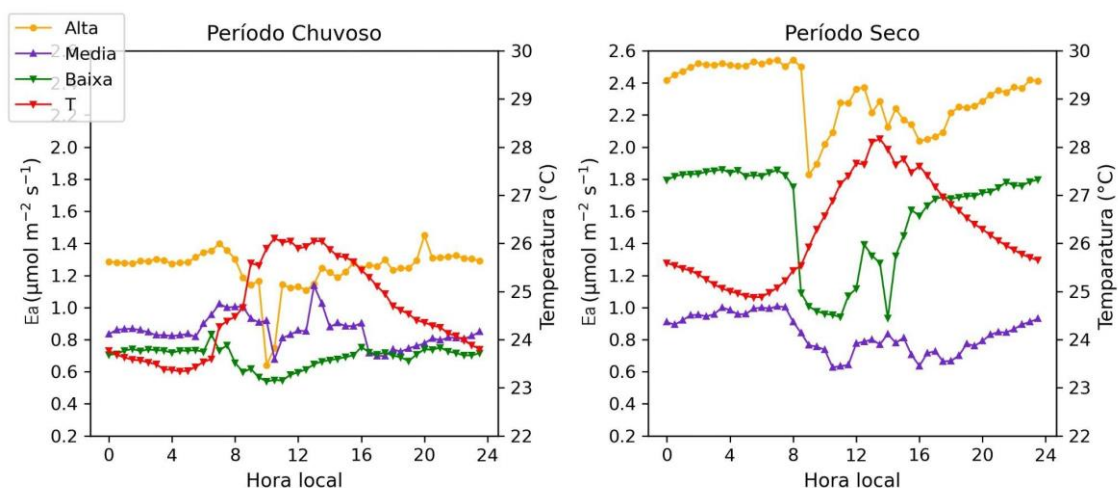
No que se refere a variável Ea correlacionada com os dados de temperatura do tronco, é possível verificar na tabela 4. Para a temperatura média os valores foram de 24,8 ± 0,11 °C para o período chuvoso e 26,1 ± 0,09 °C no período seco.

**Tabela 4.** Correlação entre a temperatura do tronco (°C) e a variável Ea (μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) para espécies de alta, média e baixa densidade da madeira, dividida no período chuvoso e seco.

Grupo	Período chuvoso		Período seco	
	R	p valor	R	p valor
Alta densidade	-0,60	<0,001	-0,2	<0,001
Média densidade	-0,54	<0,001	-0,13	<0,003
Baixa densidade	-0,13	<0,001	-0,23	<0,001

As diferenças relacionadas entre a variável temperatura do tronco e a velocidade do fluxo de seiva, para os grupos de alta e média densidade no período seco e de baixa densidade no período chuvoso (**Figura 9 e 11**),

mostraram que as duas resultaram em relações inversas com P-valor menor que 0,001, quando correlacionadas com o efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco. O aumento da temperatura pode afetar quase todos os processos biológicos, como a morfogênese, composição lipídica, atividade cambial e a atividade enzimática, o que explica a maior parte dos efeitos imediatos da temperatura nos fluxos de carbono (Dusenge et al., 2018).



**Figura 11.** Padrão geral da variável Ea ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) correlacionados com a temperatura do tronco ( $^{\circ}\text{C}$ ) para espécies de alta, média e baixa densidade da madeira, dividida no período chuvoso e seco.

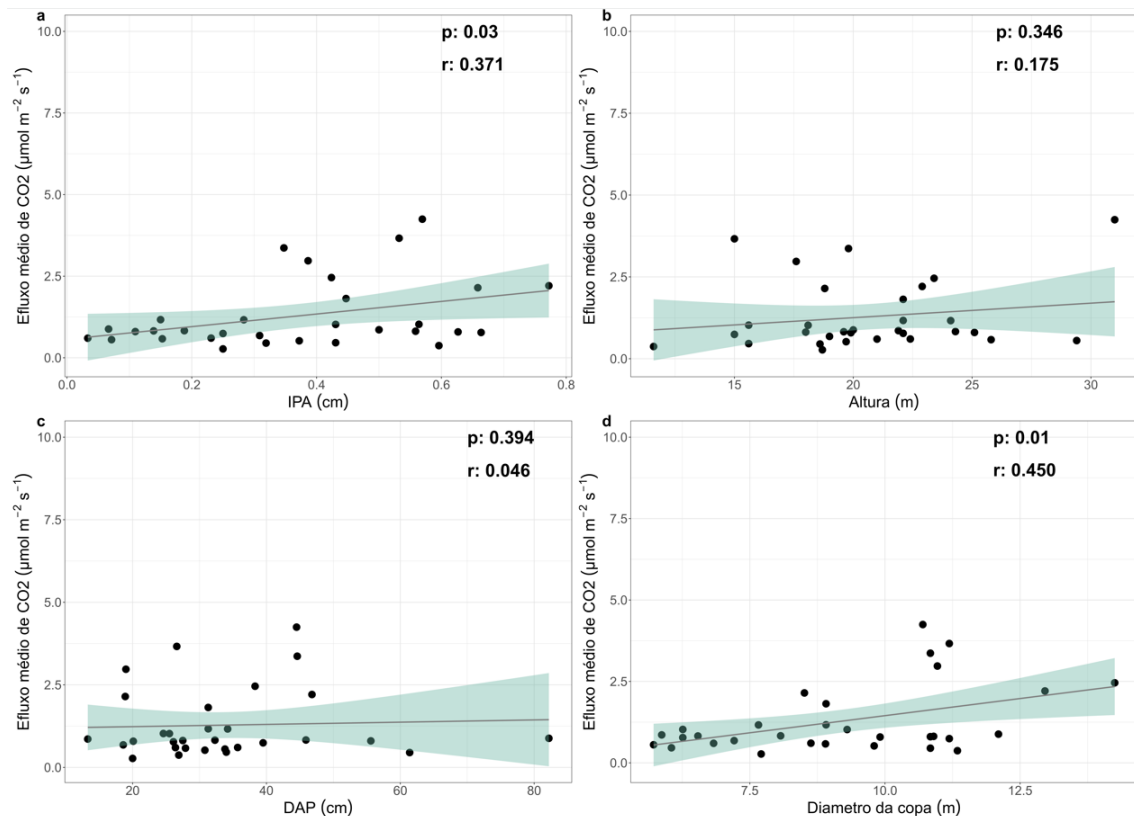
Para taxas respiratórias é esperado uma relação proporcional com a temperatura (Araki et al., 2017; Heskell, 2018). Na dinâmica da respiração celular de organismos autotróficos, alguns estudos demonstram a dependência da temperatura para o processo respiratório, apresentando relação do aumento da temperatura e consequente aumento da respiração (Atkin e Tjoelker, 2003; Gudasz et al., 2021).

No entanto, para o efluxo de CO<sub>2</sub> existe a interferência que, a partir do aumento da temperatura é provável um aumento também proporcional para a velocidade do fluxo de seiva (Teskey e McGuire, 2002), como consequência é possível que reflita em um maior transporte de ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) via xilema, gerado pelo processo respiratório, que pode explicar a redução da emissão de CO<sub>2</sub> pelo tronco (Angert et al., 2012; Kaldenhoff, 2012; Bloemen et al., 2013).

A relação inversa da temperatura e o efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco, também foram encontradas em um estudo sobre o mesmo assunto, o aumento da temperatura no início da manhã e conseqüente aumento da ascensão da seiva do xilema, diminuíram os valores do efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco, no entanto durante o dia estes valores não seguiram um padrão previsível (Kunert, 2018). No nosso período de coleta, também não foi encontrado um padrão claro durante o dia para a média da variável Ea, sendo estas alterações muito influenciadas pelas amplas variações atmosféricas, que são mais dinâmicas durante o dia, como a temperatura e as concentrações de CO<sub>2</sub> do ambiente (Araújo et al., 2002; Dusenge et al., 2018).

#### **5.4 Correlação das variáveis altura total, Incremento Periódico anual (IPA), DAP, diâmetro da copa com o efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco.**

No que se refere a correlação do efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco com as características dos indivíduos (**Figura 12**), existiram variações nos resultados encontrados. Para a altura e o diâmetro na altura do peito (DAP) correlacionada separadamente com o efluxo de CO<sub>2</sub> pelo tronco não foi encontrada uma correlação ( $r= 0,17$ ;  $r= 0,046$ ). Sendo improvável ( $p=0,346$ ;  $p= 0,394$ ) estas relações. Ou seja, estas variáveis separadas não são capazes de explicar o efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco. A relação entre a taxa de efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco com o DAP é complexa e pode ser influenciada por vários fatores, Teixeira 2010, por meio de uma análise de regressão verificou que o maior coeficiente de correlação foi encontrado no modelo que considerou outras variáveis além do DAP, reafirmando a necessidade de considerar outras variáveis para explicar a taxa de efluxo no tronco. Além disso esta pesquisa sugere que não foi encontrada uma relação entre o de efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco com o DAP, pelo fato de que o efluxo CO<sub>2</sub> no tronco pode ser influenciado por outras variáveis como o teor de água superficial no solo e temperatura, conforme citado anteriormente, assim como a correlação improvável entre o efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco com a altura das árvores. Outras variáveis em conjunto serão mais eficientes para influenciar o efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco do que apenas a altura total das árvores.



**Figura 12.** Gráfico de correlação das variáveis incremento periódico anual (IPA)(cm), diâmetro da copa (m), altura da planta (m) e DAP (cm) com o Efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

No entanto, apesar da correlação entre o diâmetro da copa e o Incremento Periódico Anual (IPA) com o efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco, ser considerada fraca ( $r=0,4$ ;  $r=0,3$  respectivamente), é muito provável ( $p=0,03$ ;  $p=0,01$ ) que exista relação entre estas variáveis com o efluxo de CO<sub>2</sub>. Neste sentido, existe uma tendência para as duas variáveis de quanto maior o IPA e o diâmetro da copa, maior será o efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco. Estes valores foram coerentes aos valores encontrados por Teixeira (2010), em que a taxa de crescimento das árvores avaliadas, foi estatisticamente dependente do efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco.

Segundo Wadsworth (2000) existe uma relação entre o diâmetro da copa e a produtividade das árvores. A dimensão da copa tem influência direta no crescimento e incremento dos indivíduos, sendo fator determinante na competição por recursos das espécies (Costa et al., 2013). Neste sentido, as variações do diâmetro da copa podem refletir nos mecanismos fisiológicos de desenvolvimento e nos fatores de crescimento como o incremento da espécie, sendo relacionado com a variação nas taxas fotossintéticas e respiratórias das árvores.



## CONCLUSÃO

O efluxo de CO<sub>2</sub> do tronco apresenta variações relacionadas à sazonalidade e se difere entre espécies com diferentes densidades da madeira. As variáveis apresentaram uma relação inversamente proporcional para o efluxo de CO<sub>2</sub> com a temperatura e a velocidade do fluxo de seiva, para os grupos de alta e média densidade no período seco e de baixa densidade no período chuvoso e apresentou correlação proporcional com o teor de água no solo. Porém não foram encontradas diferenças significativas para estas variáveis nos diferentes períodos sazonais. Foi encontrada uma correlação fraca da variável Ea com o IPA e o diâmetro da copa, sendo muito provável que exista uma relação entre estas duas variáveis com o efluxo de CO<sub>2</sub> do tronco.

A compreensão fisiológica do efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco é fundamental para melhorar a relação do ciclo do carbono nos modelos climáticos. Neste sentido, este trabalho trouxe importantes informações a respeito da variável Ea em função das diferentes estratégias de crescimento da vegetação e da relação com a amplitude de variação das condições ambientais. No entanto, ainda é necessário estudos que busquem compreender o comportamento do efluxo de CO<sub>2</sub> no tronco em resposta a eventos de seca extrema, que não foi o caso deste estudo, além de abordagens que incorporem a estrutura da floresta como fator vinculado a variável Ea, com análises relacionando a variação espacial, a posição no dossel e a relação com o crescimento, com medidas com maior frequência, juntamente com incorporação de características hidráulicas, que podem responder a lacunas que ainda permanecem incertas sobre a dimensão do efluxo de CO<sub>2</sub> para a medida da respiração dos tecidos lenhosos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre-Gutiérrez, J., Berenguer, E., Oliveras Menor, I., Bauman, D., Corral-Rivas, J. J., Nava-Miranda, M. G., ... & Malhi, Y. (2022). Functional susceptibility of tropical forests to climate change. *Nature Ecology & Evolution*, 6(7), 878-889.
- Aloni, R. (2013). "The role of hormones in controlling vascular differentiation," in Cellular Aspects of Wood Formation, ed. J. Fromm, (Berlin: Springer), 99–139. doi: 10.1007/s00425-013-1927-8
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische zeitschrift*, 22(6), 711-728.
- Amthor, J. S. (2000). The McCree–de Wit–Penning de Vries–Thornley respiration paradigms: 30 years later. *Annals of botany*, 86(1), 1-20.
- Angert, A., Muhr, J., Negron Juárez, R., Alegria Muñoz, W., Kraemer, G., Ramirez Santillan, J., ... & Trumbore, S. E. (2012). Internal respiration of Amazon tree stems greatly exceeds external CO<sub>2</sub> efflux. *Biogeosciences*, 9(12), 4979-4991.
- Araki, M.G.; Gyokusen, K.; Kajimoto, T. (2017). Vertical and seasonal variations in temperature responses of leaf respiration in a *Chamaecyparis obtusa* canopy. *Tree Physiology* 37: 1269–1284.
- Araújo, A. C., Nobre, A. D., Kruijt, B., Elbers, J. A., Dallarosa, R., Stefani, P., ... & Kabat, P. (2002). Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D20), LBA-58.
- Atkin, O. K., & Tjoelker, M. G. (2003). Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. *Trends in plant science*, 8(7), 343-351.
- Atkin, O. K., & Tjoelker, M. G. (2003). Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. *Trends in plant science*, 8(7), 343-351.
- Bloemen, J., Anne McGuire, M., Aubrey, D. P., Teskey, R. O., & Steppe, K. (2013). Internal recycling of respired CO<sub>2</sub> may be important for plant functioning under changing climate regimes. *Plant signaling & behavior*, 8(12), 555-65.
- Bowman, W. P., Barbour, M. M., Turnbull, M. H., Tissue, D. T., Whitehead, D., & Griffin, K. L. (2005). Sap flow rates and sapwood density are critical factors in within-and between-tree variation in CO<sub>2</sub> efflux from stems of mature *Dacrydium cupressinum* trees. *New Phytologist*, 167(3), 815-828.
- Bowman, W. P., Barbour, M. M., Turnbull, M. H., Tissue, D. T., Whitehead, D., & Griffin, K. L. (2005). Sap flow rates and sapwood density are critical factors in within-and

between-tree variation in CO<sub>2</sub> efflux from stems of mature *Dacrydium cupressinum* trees. *New Phytologist*, 167(3), 815-828.

Brienen, R. J., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., ... & Zagt, R. J. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519(7543), 344-348.

Budowski, G. (1965). Distribution of tropical American rainforest species in the light of successional processes. *Turrialba (Costa Rica) v. 15 (1) p. 40-42*. Swaine, M. D., & Whitmore, T. C. (1988). On the definition of ecological species groups in tropical rain forests. *Vegetatio*, 75, 81-86.

Chambers, J. Q., Tribuzy, E. S., Toledo, L. C., Crispim, B. F., Higuchi, N., Santos, J. D., ... & Trumbore, S. E. (2004). Respiration from a tropical forest ecosystem: partitioning of sources and low carbon use efficiency. *Ecological Applications*, 14(sp4), 72-88.

Chapin, F. S., Matson, P. A., Mooney, H. A., & Vitousek, P. M. (2002). Principles of terrestrial ecosystem ecology.

Chave, J., Muller-Landau, H. C., Baker, T. R., Easdale, T. A., Steege, H. T., & Webb, C. O. (2006). Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species. *Ecological applications*, 16(6), 2356-2367.

Copertino, M., Piedade, M. T. F., Vieira, I. C. G., & Bustamante, M. (2019). Desmatamento, fogo e clima estão intimamente conectados na Amazônia. *Ciência e Cultura*, 71(4), 04-05.

Costa, E. A., Finger, C. A. G., & da Cunha, T. A. (2013). Influência da posição social e do número de raios na estimativa da área de copa em araucária. *Floresta*, 43(3), 429-438.

Cox, P. M., Betts, R. A., Collins, M., Harris, P. P., Huntingford, C., & Jones, C. D. (2004). Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and applied climatology*, 78(1), 137-156.

Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spall, S. A., & Totterdell, I. J. (2000). Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408(6809), 184-187.

Cuny HE, Rathgeber CBK, Frank D, Fonti P, Makinen H, Prislan P, Rossi S, del Castillo EM, Campelo F, Vavrcik H et al. 2015. Woody biomass production lags stem-girth increase by over one month in coniferous forests. *Nature Plants* 1: 15160.

Detto, M., & Pacala, S. W. (2022). Plant hydraulics, stomatal control, and the response of a tropical forest to water stress over multiple temporal scales. *Global Change Biology*, 28(14), 4359-4376.

- Dusenge, M. E., Duarte, A. G., & Way, D. A. (2019). Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO<sub>2</sub> and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. *New Phytologist*, 221(1), 32-49.
- EMBRAPA; Antonio, I. C. Boletim agrometeorológico: Estação Agroclimatológica da Embrapa Amazônia Ocidental. (2017). Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental. Documentos, 93. 28 p. 2017.
- Fajardo, A., Siefert, A., & Laughlin, D. C. (2023). Wood density and leaf size jointly predict woody plant growth rates across (but not within) species along a steep precipitation gradient. *Journal of Ecology*.
- Fearnside, P. M. (2008). Mudanças climáticas globais e a floresta amazônica. A *biologia e as mudanças climáticas no Brasil*. RiMa editora, São Carlos. 316p, 131-150.
- Fonti, P., and Jansen, S. (2012). Xylem plasticity in response to climate. *New Phytol.* 195, 734–736. doi: 10.1111/j.1469-8137.2012.04252.x
- Fryhle, C. B., & Snyder, S. A. (2022). *Organic chemistry*. John Wiley & Sons.
- Gatti, L. V., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Gatti Domingues, L., Cassol, H. L., ... & Neves, R. A. (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595(7867), 388-393.
- Gauí, T. D. (2013). Mudança na composição de espécies arbóreas em uma floresta de terra firme explorada experimentalmente há 25 anos na Amazônia central. Dissertação de mestrado. 61p Programa de Ciências Florestais. INPA. Manaus.
- Gora, E. M., & Esquivel-Muelbert, A. (2021). Implications of size-dependent tree mortality for tropical forest carbon dynamics. *Nature Plants*, 7(4), 384-391.
- Gudasz, C., Karlsson, J., & Bastviken, D. (2021). When does temperature matter for ecosystem respiration?. *Environmental Research Communications*, 3(12), 121001.
- Hagen, J. B. (1992). *An entangled bank: the origins of ecosystem ecology*. Rutgers University Press.
- Heskel, M.A. (2018). Small flux, global impact: Integrating the nuances of leaf mitochondrial respiration in estimates of ecosystem carbon exchange. *American Journal of Botany* 105: 815–818.
- Higuchi, N., Jardim, F., Santos, J. D., Barbosa, A. P., & Wood, T. W. (1985). Bacia 3- Inventário florestal comercial. *Acta amazônica*, 15, 327-370.
- Higuchi, N., Santos, J. D., Vieira, G., Ribeiro, R. J., Sakurai, S., Ishizuka, M., ... & Saito, S. (1998). Análise Estrutural da Floresta Primária da Bacia do Rio Cuieiras, ZF-

2, Manaus-AM. *Pesquisas Florestais para Conservação da Floresta e Reabilitação de Áreas Degradadas da Amazônia*, pgs. 51-81.

Huang, J., Li, Y., Fu, C., Chen, F., Fu, Q., Dai, A., ... & Wang, G. (2017). Dryland climate change: Recent progress and challenges. *Reviews of Geophysics*, 55(3), 719-778.

IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jardine, K. J., Cobello, L. O., Teixeira, L. M., East, M. M. S., Levine, S., Gimenez, B. O., ... & Chambers, J. Q. (2022). Stem respiration and growth in a central Amazon rainforest. *Trees*, 1-14.

Jardine, K., Augusto, E., Levine, S. D., Sunder, A., Som, S., & Chambers, J. (2023). Development of a lightweight, portable, waterproof, and low power stem respiration system for trees. *MethodsX*, 10, 101986.

Jones, R. N. (2000). Analysing the risk of climate change using an irrigation demand model. *Climate research*, 14(2), 89-100.

Kaldenhoff, R. (2012). Mechanisms underlying CO<sub>2</sub> diffusion in leaves. *Current opinion in plant biology*, 15(3), 276-281.

Katz, R. W. (2002). Techniques for estimating uncertainty in climate change scenarios and impact studies. *Climate research*, 20(2), 167-185.

Kira, T. (1978). Carbon cycling. Pp. 272-276. In: T. Kira, Y. Ono & T. Hosokawa (eds.), *Biological Production in a Warm-temperate Evergreen Oak Forest of Japan*. University of Tokyo Press, Tokyo.

Kunert, N. (2018). A case study on the vertical and diurnal variation of stem CO<sub>2</sub> effluxes in an Amazonian forest tree. *Trees*, 32, 913-917.

Lambers, H. (1985). Respiration in intact plants and tissues: its regulation and dependence on environmental factors, metabolism and invaded organisms. In *Higher plant cell respiration* (pp. 418-473). Springer, Berlin, Heidelberg.

Litton, C. M., Raich, J. W., & Ryan, M. G. (2007). Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology*, 13(10), 2089-2109.

Malhi, Y. (2012). The productivity, metabolism and carbon cycle of tropical forest vegetation. *Journal of Ecology*, 100(1), 65-75.

- Manzoni, S., Taylor, P., Richter, A., Porporato, A., & Ågren, G. I. (2012). Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils. *New Phytologist*, 196(1), 79-91.
- Marra, D.M. (2010) Sucessão florestal em área atingida por tempestade convectiva na região de Manaus, Amazônia Central. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas da Amazônia. Manaus. 105p.
- McDowell NG, Allen CD. (2015). Darcy's law predicts widespread forest mortality under climate warming. *Nature Climate Change* 5: 669–672.
- McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., ... & Yezpez, E. A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought?. *New phytologist*, 178(4), 719-739.
- McGuire, M. A., & Teskey, R. O. (2002). Microelectrode technique for in situ measurement of carbon dioxide concentrations in xylem sap of trees. *Tree Physiology*, 22(11), 807-811.
- McGuire, M. A., & Teskey, R. O. (2004). Estimating stem respiration in trees by a mass balance approach that accounts for internal and external fluxes of CO<sub>2</sub>. *Tree Physiology*, 24(5), 571-578.
- Meinzer, F. C., Goldstein, G., & Andrade, J. L. (2001). Regulation of water flux through tropical forest canopy trees: do universal rules apply?. *Tree physiology*, 21(1), 19-26.
- Meir P, Grace J. (2002). Scaling relationships for woody tissue respiration in two tropical rain forests. *Plant, Cell & Environment* 25: 963–973.
- Miranda EJ, Vourlitis GL, Priante N, Priante PC, Campelo JH, Suli GS, Fritzen CL, Lobo FDA, Shiraiwa S. (2005). Seasonal variation in the leaf gas exchange of tropical forest trees in the rain forest-savanna transition of the southern Amazon Basin. *Journal of Tropical Ecology* 21: 451–460.
- Moura, M. M. S. (2020). Simulações dos estoques de carbono em floresta tropical sazonalmente seca ante às mudanças climáticas.
- NOAA, (2022) Carbon Cycle Greenhouse Gases: Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em: Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases (noaa.gov)
- Oishi, A. C., Hawthorne, D. A., & Oren, R. (2016). Baseline: an open-source, interactive tool for processing sap flux data from thermal dissipation probes. *SoftwareX*, 5, 139-143.

- Ramírez Méndez, C. (2018). Influência do El Niño 2015-2016 no incremento diamétrico das árvores da Amazônia Central. Dissertação de mestrado. 71 p INPA.. Manaus.
- Reichstein, M., Bahn, M., Ciais, P., Frank, D., Mahecha, M. D., Seneviratne, S. I., ... & Wattenbach, M. (2013). Climate extremes and the carbon cycle. *Nature*, *500*(7462), 287-295.
- Roderick, M.L. (2000). On the measurement of growth with applications to the modelling and analysis of plant growth. *Funct. Ecol.*, *14*, 244–251.
- Rödig, E., Cuntz, M., Rammig, A., Fischer, R., Taubert, F., & Huth, A. (2018). The importance of forest structure for carbon fluxes of the Amazon rainforest. *Environmental Research Letters*, *13*(5), 054013.
- Rodríguez-Calcerrada J, Martin-StPaul NK, Lempereur M, Ourcival J-M, Rey MdCd, Joffre R, Rambal S. (2014). Stem CO<sub>2</sub> efflux and its contribution to ecosystem CO<sub>2</sub> efflux decrease with drought in a Mediterranean forest stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, *195–196*:61–72.
- Rowland L, da Costa ACL, Galbraith DR, Oliveira RS, Binks OJ, Oliveira AAR, Pullen AM, Doughty CE, Metcalfe DB, Vasconcelos SS et al. 2015. Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. *Nature* *528*: 119–122.
- Rowland, L., da Costa, A. C., Oliveira, A. A., Oliveira, R. S., Bittencourt, P. L., Costa, P. B., ... & Meir, P. (2018). Drought stress and tree size determine stem CO<sub>2</sub> efflux in a tropical forest. *New Phytologist*, *218*(4), 1393-1405.
- Ryan MG, Hubbard RM, Clark DA, Sanford RL. (1994). Woody-tissue respiration for *Simarouba amara* and *Minquartia guianensis*, two tropical wet forest trees with different growth habits. *Oecologia* *100*: 213–220.
- Saleska, S. R., Wu, J., Guan, K., Araujo, A. C., Huete, A., Nobre, A. D., & Restrepo-Coupe, N. (2016). Dry-season greening of Amazon forests. *Nature*, *531*(7594), E4-E5.
- Saveyn A, Steppe K, Lemeur R. (2007). Drought and the diurnal patterns of stem CO<sub>2</sub> efflux and xylem CO<sub>2</sub> concentration in young oak (*Quercus robur*). *Tree Physiology* *27*: 365–374.
- Schlickmann, M. B., Sandi, B. A., Rech, L. F., Muzeka, L. M., Sonda, R., Camargo, V. C., ... & Higuchi, P. (2019). Traços funcionais e performance de espécies arbóreas em uma Floresta Ombrófila Mista no Planalto Sul-Catarinense. *Ciência Florestal*, *29*, 1592-1600.

- Shimoyama, V. D. S., & Barrichello, L. E. G. (1989). Densidade básica da madeira, melhoramento e manejo florestal. *Série técnica IPEF*, 6(20), 1-22.
- Silva, R. P. D. (2007). Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM). Tese de doutorado. INPA. Manaus
- Smith, M. N., Taylor, T. C., van Haren, J., Rosolem, R., Restrepo-Coupe, N., Adams, J., ... & Saleska, S. R. (2020). Empirical evidence for resilience of tropical forest photosynthesis in a warmer world. *Nature Plants*, 6(10), 1225-1230.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. Artmed Editora.
- Teixeira, L. M. (2010). Variáveis ecofisiológicas do tronco como indicadores de sustentabilidade da floresta tropical manejada seletivamente. Tese de doutorado. INPA. Manaus.
- Teskey, R. O., & McGuire, M. A. (2002). Carbon dioxide transport in xylem causes errors in estimation of rates of respiration in stems and branches of trees. *Plant, Cell & Environment*, 25(11), 1571-1577.
- Teskey, R. O., & McGuire, M. A. (2008). Measurement of stem respiration of sycamore (*Platanus occidentalis* L.) trees involves internal and external fluxes of CO<sub>2</sub> and possible transport of CO<sub>2</sub> from roots. *Plant, Cell & Environment*, 30(5), 570-579.
- Teskey, R. O., Saveyn, A., Steppe, K., & McGuire, M. A. (2008). Origin, fate and significance of CO<sub>2</sub> in tree stems. *New Phytologist*, 177(1), 17-32.
- Thornley, J. H. M., & Cannell, M. G. R. (2000). Modelling the components of plant respiration: representation and realism. *Annals of Botany*, 85(1), 55-67.
- Trumbore, S. E., Angert, A., Kunert, N., Muhr, J., & Chambers, J. Q. (2013). What's the flux? Unraveling how CO<sub>2</sub> fluxes from trees reflect underlying physiological processes. *The New phytologist*, 197(2), 353-355.
- Valentini, R., Matteucci, G., Dolman, A. J., Schulze, E. D., Rebmann, C. J. M. E. A. G., Moors, E. J., ... & Jarvis, P. G. (2000). Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 404(6780), 861-865.
- Van Schaik, E., Killaars, L., Smith, N. E., Koren, G., Van Beek, L. P. H., Peters, W., & van der Laan-Luijkx, I. T. (2018). Changes in surface hydrology, soil moisture and gross primary production in the Amazon during the 2015/2016 El Niño. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1760), 20180084.



- Varone L, Gratani L. (2015). Leaf respiration responsiveness to induced water stress in Mediterranean species. *Environmental and Experimental Botany* 109: 141–150.
- Wadsworth, F. H. (2000). *Producción forestal para América tropical*. Departamento de Agricultura de los EE. UU., Servicio Forestal.
- White, A., AD (Andrew) Friend, & MGR (Melvin) Cannell. (1997). *The impact of climate change on natural vegetation*.
- Xu, C., McDowell, N. G., Fisher, R. A., Wei, L., Sevanto, S., Christoffersen, B. O., ... & Middleton, R. S. (2019). Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change. *Nature Climate Change*, 9(12), 948-953.
- Zach, A., Horna, V., & Leuschner, C. (2010). Diverging temperature response of tree stem CO<sub>2</sub> release under dry and wet season conditions in a tropical montane moist forest. *Trees*, 24, 285-296.