



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA  
AMAZÔNIA MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS  
BOTÂNICA TROPICAL**

**STEFANY PRISCILA REIS FIGUEIREDO**

**AJUSTES ANATÔMICOS E FISIOLÓGICOS REVELAM MECANISMOS DE  
SOBREVIVÊNCIA EM MUDAS SOB DÉFICIT HÍDRICO**

**BELÉM  
PARÁ  
2025**

**STEFANY PRISCILA REIS FIGUEIREDO**

**AJUSTES ANATÔMICOS E FISIOLÓGICOS REVELAM MECANISMOS DE  
SOBREVIVÊNCIA EM MUDAS SOB DÉFICIT HÍDRICO**

Trabalho de conclusão de dissertação  
apresentado à Universidade Federal Rural  
da Amazônia/Museu  
Paraense Emílio Goeldi como requisito para  
obtenção do título de Mestre do Programa de  
Pós-Graduação em Ciências Biológicas.  
Área de concentração: Botânica Tropical.

Orientadora: Dra. Grazielle Sales Teodoro.  
Coorientadora: Dra. Caroline Signori-Muller  
Linha de Pesquisa: Ecologia, Manejo e  
Conservação

**BELÉM-  
PARÁ  
2025**

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

- 
- F475a Figueiredo, Stefany Priscila Reis  
Ajustes anatômicos e fisiológicos revelam mecanismos de sobrevivência em mudas sob  
déficit hídrico / Stefany Priscila Reis Figueiredo. - 2025.  
42 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Ciências  
Biológicas (CB), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da  
Amazônia, Belém, 2025.  
Orientador: Profa. Dra. Grazielle Sales Teodoro  
Coorientador: Profa. Dra. Caroline Signori-Muller.
1. Ecologia - estratégias funcionais - Amazônia. 2. Eficiência Hídrica. 3. Arquitetura  
Hidráulica.  
4. Seca. 5. Ponto Perda de Turgor. I. Teodoro, Grazielle Sales, *orient.* II. Título
-

## 1. STEFANY PRISCILA REIS FIGUEIREDO

### AJUSTES ANATÔMICOS E FISIOLÓGICOS REVELAM MECANISMOS DE SOBREVIVÊNCIA EM MUDAS SOB DÉFICIT HÍDRICO

Trabalho de conclusão de dissertação  
apresentado à Universidade Federal Rural  
da Amazônia/Museu  
Paraense Emílio Goeldi como requisito para  
obtenção do título de Mestre do Programa de  
Pós-Graduação em Ciências Biológicas.  
Área de concentração: Botânica Tropical.

Data de aprovação: 24/04/2025

## 2. BANCA EXAMINADORA



---

Dra. Grazielle Sales Teodoro – Orientadora  
Universidade Federal do Pará - UFPA



---

Dra. Patricia de Britto Costa - examinador 1  
Universidade Estadual de Campinas -  
Unicamp



---

Dr. André Luiz Giles de Oliveira - examinador  
2 Universidade Federal de Santa Catarina -  
UFSC



Documento assinado digitalmente

LAYSE KRISTINE CORREA LOPES

Data: 04/06/2025 09:57:00-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dra. Layse Kristine Corrêa Lopes –  
examinador 3 Museu Paraense Emilio  
Goeldi – MPEG

## AGRADECIMENTOS

Agradecer parece algo simples, mas encerrar um ciclo de dois anos de construção de conhecimento foi um grande desafio. Ao longo dessa jornada acadêmica, conheci pessoas incríveis, e um amigo uma vez me disse que ciência não se faz sozinha. Essa foi uma das maiores verdades que aprendi durante toda a pós-graduação. Foram muitos momentos gratificantes, mas também períodos de ansiedade e autocrítica. Diante disso, quero expressar minha sincera gratidão a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa caminhada.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por nunca ter me permitido desistir, mesmo nos momentos mais difíceis, e por me mostrar que sempre há pessoas dispostas a ajudar e caminhar ao nosso lado. No ritmo acelerado do dia a dia, nem sempre percebemos, mas Deus nos coloca no caminho certo e ao lado das pessoas certas.

Aos meus pais, Roberto e Rose Mary Figueiredo, por se dedicarem incansavelmente a me proporcionar a melhor educação e por serem meu maior apoio em todas as escolhas da minha vida. Ao meu irmão, Ewerton Figueiredo, pela amizade e pelo apoio incondicional. À minha vó Adelizia Figueiredo (in memoriam), por todo o amor e pelos valiosos ensinamentos que carrego comigo. Agradeço também a toda a minha família pelo carinho e suporte constantes.

À minha orientadora, Dra. Grazielle Sales Teodoro, por ser, além de uma excelente educadora, uma verdadeira incentivadora da ciência. Sou grata por sua compreensão, por respeitar minhas limitações e por me apoiar no desenvolvimento deste estudo.

A todos meus amigos e parceiros do Laboratório de Produtos Primários da UFPA – Ecopro, em especial ao meu parceiro de pesquisa, Renan Marques, pelos desafios enfrentados juntos nesse projeto. À Beatriz Barbosa, por sua paciência e dedicação, tanto como amiga quanto como profissional, sempre disposta a ouvir e ajudar. Ao meu amigo Anthony Barbosa, pelo apoio e pelas palavras sempre positivas. Às mestres da anatomia vegetal, Layse Lopes e Zelina Ataíde, do Museu Paraense Emílio Goeldi, pelos valiosos ensinamentos. E ao meu amigo Renan Domingues, pelo apoio essencial nesta etapa do trabalho.

Stefany Priscila Reis  
Figueiredo.

## SUMÁRIO

|           |                                                                                                                                       |           |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                                               | <b>9</b>  |
| <b>2.</b> | <b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                                                                                                       | <b>11</b> |
| 2.1       | Local do Estudo e Delineamento Experimental .....                                                                                     | 11        |
| 2.2       | Características Funcionais .....                                                                                                      | 15        |
| 2.2.1     | Anatomia da Madeira .....                                                                                                             | 15        |
| 2.2.2     | Densidade da Madeira .....                                                                                                            | 17        |
| 2.2.3     | Potencial hídrico.....                                                                                                                | 17        |
| 2.2.4     | Curva Pressão-Volume.....                                                                                                             | 17        |
| 2.2       | Análise de Dados.....                                                                                                                 | 18        |
| <b>3.</b> | <b>RESULTADOS.....</b>                                                                                                                | <b>19</b> |
| 3.1.      | <i>Variação nos atributos anatômicos e fisiológicos em resposta à disponibilidade hídrica.....</i>                                    | <i>19</i> |
| 3.2.      | <i>Coordenação entre atributos fisiológicos foliares, densidade da madeira e atributos anatômicos da arquitetura hidráulica. ....</i> | <i>23</i> |
| <b>4.</b> | <b>DISCUSSÃO .....</b>                                                                                                                | <b>27</b> |
| 4.1.      | <i>Variações nas características hidráulicas em resposta à disponibilidade de água. ....</i>                                          | <i>27</i> |
| 4.2.      | <i>Variação nos atributos fisiológicos em resposta à disponibilidade de água. ....</i>                                                | <i>29</i> |
| 4.3.      | <i>Relação entre os atributos .....</i>                                                                                               | <i>31</i> |
| <b>5.</b> | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                                                                                                | <b>33</b> |
| <b>6.</b> | <b>ACKNOWLEDGEMENTS.....</b>                                                                                                          | <b>33</b> |
| <b>7.</b> | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                              | <b>34</b> |
| <b>8.</b> | <b>MATERIAL SUPLEMENTAR .....</b>                                                                                                     | <b>43</b> |

## RESUMO

Algumas florestas tropicais experimentam secas prolongadas, tornando essencial compreender os mecanismos de resistência à seca das espécies. Características anatômicas relacionadas à arquitetura hidráulica explicam como ocorre o transporte de água nas plantas e como as espécies lidam com a escassez hídrica. No entanto, a capacidade das espécies de ajustar sua arquitetura hidráulica à disponibilidade de água permanece pouco clara. Avaliamos variações na arquitetura hidráulica e nas respostas fisiológicas à seca, com foco na coordenação entre características anatômicas e fisiológicas. Este estudo foi conduzido em casa de vegetação com mudas de três espécies tropicais: *Clitoria fairchildiana*, *Manilkara elata* e *Bertholletia excelsa*. Aplicamos três tratamentos de disponibilidade hídrica (15%, 50% e 100% da capacidade de campo) durante quatro meses. Mensuramos características anatômicas do ramo: área do vaso (VA), diâmetro hidráulico (Dh), densidade do vaso (VD), índice de agrupamento dos vasos (VG), fração do lúmen do vaso (F) e condutividade teórica do xilema (Ks); e características fisiológicas: potencial hídrico foliar pré-dawn ( $\Psi_{PD}$ ) e ao meio-dia ( $\Psi_{MD}$ ), além de atributos da curva pressão–volume. Todas as espécies ajustaram seus atributos em resposta à disponibilidade de água. *Manilkara elata*, a espécie com maior densidade da madeira, apresentou menores variações anatômicas e hidráulicas, com apenas uma diminuição no ponto de perda de turgor por meio de ajuste osmótico sob limitação hídrica. As duas espécies com menor densidade da madeira mostraram respostas contrastantes. *Bertholletia excelsa* aumentou a eficiência hidráulica ao ampliar Ks, VA e Dh, enquanto *C. fairchildiana* aumentou a resistência à seca ajustando o ponto de perda de turgor e o potencial osmótico. Nossos resultados destacam um trade-off entre eficiência no transporte de água e resistência à seca em *C. fairchildiana*. Esses resultados indicam respostas distintas em cada espécie que contribuem para a sobrevivência sob limitação hídrica.

**Palavras-chave:** Estratégias funcionais, arquitetura hidráulica, eficiência hidráulica, ajuste osmótico, ponto de perda de turgor

## ABSTRACT

Some tropical forests experience prolonged droughts, making it essential to understand species' drought resistance mechanisms. Anatomical traits related to hydraulic architecture explain how water transport occurs in plants and how species cope with water scarcity. However, the ability of species to adjust their hydraulic architecture to water availability remains unclear. We assessed variations in hydraulic architecture and physiological responses to drought, focusing on the coordination between anatomical and physiological traits. This study was conducted in a greenhouse with seedlings of three tropical species: *Clitoria fairchildiana*, *Manilkara elata*, and *Bertholletia excelsa*. We applied three water availability treatments (15%, 50%, and 100% of field capacity) for four months. We measured branch anatomical traits: Vessel area (VA), Hydraulic diameter (Dh), Vessel density (VD), Vessel grouping index (VG), Vessel lumen fraction (F), and Xylem theoretical conductivity (Ks); physiological traits: Leaf predawn ( $\Psi_{PD}$ ) and midday ( $\Psi_{MD}$ ) water potential, and pressure–volume curve traits. All species adjusted their traits in response to water availability. *Manilkara elata*, the species with the highest wood density, exhibited smaller anatomical and hydraulic trait variations, with only a decrease in turgor loss point through osmotic adjustment under water limitation. The two species with lower wood density showed contrasting responses. *Bertholletia excelsa* enhanced hydraulic efficiency by increasing Ks, VA and Dh, while *C. fairchildiana* increased drought resistance by adjusting turgor loss point and osmotic potential. Our results highlight a trade-off between water transport efficiency and drought resistance in *C. fairchildiana*. These results indicate distinct responses in each species that contribute to species survival under water limitation.

**Key words:** functional strategies, hydraulic architecture, hydraulic efficiency, osmotic adjustment, turgor loss point

## 1. INTRODUÇÃO

Algumas florestas tropicais podem enfrentar longos períodos de seca intensificados por ações antrópicas, como a expansão da agricultura, atividades de mineração, desmatamento e degradação, entre outros fatores (Chadwick et al., 2015; Pokhrel et al., 2021), afetando a biodiversidade, o armazenamento de carbono e reduzindo a provisão de serviços ecossistêmicos (Lapola et al., 2023; Marengo et al., 2011). A Floresta Amazônica é considerada vulnerável a essas mudanças, com previsões de que algumas regiões alcancem um ponto de inflexão, alterando a configuração da vegetação (Flores et al., 2024). A floresta amazônica está cada vez mais exposta a secas extremas, que têm sido intensificadas por eventos atípicos de El Niño e/ou condições quentes no Atlântico Tropical Norte, como os registrados em 1997/98, 2005, 2010, 2015/16 e 2023/24, sendo este último considerado um novo recorde de seca e de condições quentes na bacia amazônica (Espinoza et al., 2024; Jiménez-Muñoz et al., 2016; Yao et al., 2023). Essas condições de seca dificultam a manutenção da resiliência dessas florestas (Allen et al., 2015).

Diante do cenário de instabilidade climática, é crucial compreender os mecanismos de resistência à seca das espécies arbóreas tropicais. Isso pode ajudar a explicar possíveis mudanças na estrutura, composição e funcionamento da floresta amazônica e pode orientar a seleção de espécies adequadas para a restauração florestal (Comita e Engelbrecht, 2014; Feldpausch et al., 2016). A Floresta Amazônica é conhecida por sua vasta diversidade de espécies vegetais e distintos comportamentos fenológicos (Souza et al., 2015; Oliveira et al., 2021), que levam a respostas diversas aos períodos de escassez hídrica (Rao et al., 2024). As espécies vegetais empregam diferentes estratégias para lidar com a seca, variando de estratégias de evitação, como a queda de folhas ou raízes profundas, até a tolerância à seca, com ajustes morfofisiológicos e anatômicos que possibilitam a sobrevivência durante secas prolongadas (Oliveira et al., 2021).

Características funcionais são características morfológicas, fisiológicas ou fenológicas herdadas que influenciam a adequação e o desempenho de um indivíduo. Esses traços podem servir como indicadores úteis para analisar as respostas das

espécies às mudanças ambientais (Gao et al., 2023; Rao et al., 2024; Violle et al., 2007). Eles permitem compreender a resistência das espécies e prever suas chances de sobrevivência em resposta a variações na disponibilidade de água. Alguns traços, como o ponto de perda de turgor ou murcha, são considerados indicadores-chave de tolerância à seca em árvores tropicais (Barlett et al., 2012). A variação no ponto de perda de turgor pode ocorrer à medida que o solo seca, ampliando a faixa dentro da qual a planta pode permanecer metabolicamente ativa por meio do ajuste osmótico, como o acúmulo de solutos (Bartlett et al., 2014). Além disso, a relação entre a pressão de turgor e o módulo de elasticidade é evidente em várias células vegetais, onde o aumento do turgor eleva a tensão da parede celular, aumentando assim a elasticidade e a rigidez geral do tecido (Zhang et al., 2024). Adicionalmente, o ponto de perda de turgor em alguns estudos está ligado à resistência ao embolismo (potencial no qual as plantas perdem 50% de sua condutividade hídrica (P50)), o que é um indicador importante da vulnerabilidade das árvores em toda a bacia amazônica (Álvarez-Cansino et al., 2022; Castillo-Argaez et al., 2024; Choat et al., 2012; Tavares et al., 2023).

Os atributos anatômicos dos ramos relacionados à arquitetura hidráulica (Tyree and Ewers, 1991), como o tamanho e o número de vasos do xilema, ajudam a compreender como ocorre o transporte de água e nutrientes nas plantas e como as espécies lidam com a escassez hídrica ou o encharcamento (Janssen et al., 2020). Variações no arranjo, tamanho, conectividade e agrupamento dos vasos podem resultar em trade-offs entre segurança e eficiência hidráulica (Gleason, 2016; Li et al., 2023). Devido a restrições biofísicas, as espécies podem priorizar uma função em detrimento de outra. Vasos maiores, mais longos e agrupados tendem a ser mais eficientes no transporte de água do que vasos isolados, estreitos ou menores. No entanto, uma maior área de vaso também aumenta o risco de embolismo (Tyree e Alexander, 1993; Tyree e Zimmermann, 2002). Ainda assim, a capacidade das espécies de ajustar sua arquitetura hidráulica em resposta a ambientes com disponibilidade hídrica contrastante permanece pouco clara.

Nesse contexto, estudos mais detalhados sobre espécies tropicais e suas respostas à seca são cruciais para a compreensão e o desenvolvimento de estratégias futuras de manejo de espécies. Assim, neste estudo, avaliamos mudas de três espécies

tropicais que diferem em sua deciduidade e densidade da madeira e que são comumente utilizadas em projetos de restauração no Leste da Amazônia. Escolhemos o estágio de muda porque, nesse estágio de desenvolvimento, as plantas podem ser mais vulneráveis e sujeitas a variações estruturais devido às mudanças ambientais (James et al., 2011). Nosso objetivo foi avaliar variações na arquitetura hidráulica e nas respostas fisiológicas à seca em cada espécie, bem como a coordenação entre os traços anatômicos e fisiológicos, avaliando se há um trade-off entre a eficiência no transporte de água e a resistência à seca. Nossa hipótese é que todas as espécies estudadas apresentariam modificações em sua arquitetura hidráulica, priorizando a segurança hidráulica em detrimento da eficiência no transporte de água (diminuindo a condutividade hidráulica específica, o diâmetro hidráulico e a área do vaso), enquanto investem em maior tolerância à seca (ponto de perda de turgor mais negativo). Assim, esperamos um trade-off entre eficiência hidráulica e tolerância à seca.

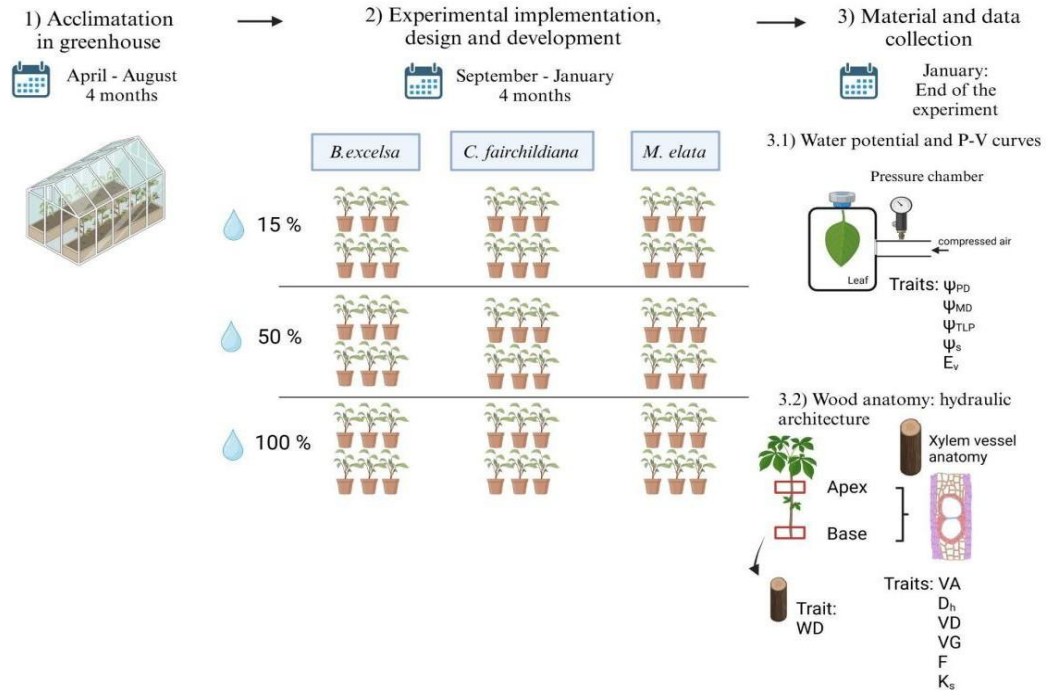
## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Local do Estudo e Delineamento Experimental

Nosso experimento foi conduzido em uma casa de vegetação composta por estruturas laterais, paredes de tela e cobertura de acrílico, localizada no Instituto de Ciências Biológicas – ICB, Universidade Federal do Pará – UFPA (1° 28' 23" S, 48° 27' 29" W; 11 m s.n.m.), durante o período de fevereiro de 2023 a fevereiro de 2024. A classificação climática é tropical úmido (Af), segundo Köppen e Geiger, com temperatura média de 26,8 °C e precipitação média anual de 2537 mm (Alvares et al., 2013).

Para o experimento (Figura 1), utilizamos mudas de três espécies arbóreas tropicais: *Clitoria fairchildiana* R.A. Howard, *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. e *Bertholletia excelsa* Bonpl. (Tabela 1). Essas espécies são comumente utilizadas na recuperação de áreas degradadas no estado do Pará. As mudas, com aproximadamente três meses de idade, foram obtidas em viveiros localizados no município de Parauapebas, Pará, Brasil. Medidas iniciais de altura e diâmetro do caule foram realizadas para considerar a variação intraespecífica no tamanho das mudas e orientar a escolha do tamanho do vaso para o transplante após 30 dias de aclimação na casa de vegetação. As mudas de *M. elata* (altura média =  $45,6 \pm 10,7$  cm; diâmetro

médio =  $8,0 \pm 1,1$  mm) e *C. fairchildiana* (altura média =  $77,6 \pm 23,2$  cm; diâmetro médio =  $11,0 \pm 1,7$  mm), que eram menores, foram transplantadas em vasos de cinco litros, enquanto para as mudas de *B. excelsa* (altura média =  $109,1 \pm 12,3$  cm; diâmetro médio =  $11,2 \pm 1,5$  mm), que eram maiores, utilizamos vasos de oito litros, garantindo que não houvesse danos aos seus sistemas radiculares.



**Figura 1.** Desenho gráfico representando todas as etapas seguidas no experimento: 1) Aclimação na casa de vegetação, 2) Implementação, delineamento e desenvolvimento experimental, e 3) Coleta de material e dados. Criado no BioRender. Barbosa, B.V. (2025).

**Tabela 1.** Descrição das espécies utilizadas no estudo, sua importância ecológica e uso.

| <b>Espécies</b>               | <b>Família</b> | <b>Importância Ecológica</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Bertholletia excelsa</i>   | Lecythidaceae  | Espécie arbórea perene de grande porte com crescimento relativamente rápido. É uma espécie importante para programas de restauração florestal e também relevante para a indústria alimentícia na produção de castanhas-do-pará (Yared et al., 1993; Costa et al., 2009). Nome popular: Castanheira.                                              |
| <i>Clitoria fairchildiana</i> | Fabaceae       | Espécie arbórea nativa de porte médio a grande, decídua e de rápido crescimento. Amplamente utilizada em projetos de reflorestamento, é comumente encontrada em florestas ombrófilas densas (Lorenzi, 2002; Silva & Carvalho, 2008). Nome popular: Paleteira.                                                                                    |
| <i>Manilkara elata</i>        | Sapotaceae     | Espécie arbórea perene de grande porte, com alta densidade da madeira e crescimento lento. É considerada uma das mais valorizadas no mercado internacional para a construção civil (International Tropical Timber Organization - ITTO, 2020). Ecologicamente, é considerada tolerante à sombra (Swaine et al., 1988). Nome popular: Maçaramduba. |

Os vasos foram preenchidos com um substrato na proporção de 2:1:1, composto por duas partes de solo, uma parte de composto orgânico e uma parte de areia branca. O substrato utilizado foi submetido à análise química para determinação da fertilidade (avaliada por pH,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}+\text{Al}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , P disponível e  $\text{K}^{+}$ ) e à análise de textura, de acordo com a metodologia proposta por Teixeira et al. (2017). Os resultados da análise indicaram a classificação textural como solo franco arenoso de baixa fertilidade, caracterizado por baixa saturação por bases, alta saturação de alumínio, elevada acidez e baixos teores de nutrientes essenciais (Tabela S1), semelhante aos solos da Amazônia. Essa semelhança sugere que as condições edáficas do experimento refletem aquelas encontradas em ambientes naturais amazônicos (Lima et al., 2022). Após o transplante para os vasos, as mudas foram irrigadas diariamente (Figura 1) para aclimação ao novo vaso e substrato, no período de abril

a agosto de 2023.

Calculamos a capacidade de retenção de água do solo (*Field capacity* – FC) para cada tamanho de vaso, pois isso era necessário para determinar o volume de água de cada tratamento. Para determinar a capacidade de campo (FC), um vaso de cada espécie foi saturado com água até atingir sua FC, verificada com um sensor de umidade do solo, para determinação do teor relativo de água do solo (TRAS), que foi estabelecido como referência para a disponibilidade hídrica em cada tratamento. As mudas foram irrigadas utilizando um béquero graduado, garantindo que a quantidade correta de água fosse fornecida a cada indivíduo. A umidade do solo foi mantida constante ao longo do experimento, sendo monitorada com um sensor de umidade do solo (sensor Minipa – modelo MV-331). Monitoramos também a temperatura e a umidade na casa de vegetação durante o experimento. Estabelecemos três tratamentos de água: 15% (T1), 50% (T2) e 100% (T3) da capacidade de retenção de água do solo. Foram utilizados seis (6) indivíduos por tratamento por espécie, totalizando dezoito (18) indivíduos por espécie. As plantas foram submetidas a esses regimes hídricos de setembro de 2023 a janeiro de 2024, totalizando quatro meses em condições experimentais (Figura 1).

Medidas iniciais de altura e diâmetro do caule foram realizadas para todos os indivíduos das três espécies. Devido à variação no tamanho das mudas dentro de cada espécie, elas foram distribuídas aleatoriamente entre os tratamentos para garantir uma distribuição equilibrada de tamanhos. Utilizamos um delineamento experimental em blocos casualizados, no qual as espécies foram organizadas em bancadas na casa de vegetação, e os indivíduos foram alocados aleatoriamente nos tratamentos e blocos para assegurar adequada randomização. Os vasos foram rotacionados entre as bancadas a cada sete dias, randomizando as condições para evitar viés nos dados. Ao final do experimento, foram medidos o diâmetro do caule e o número de folhas por indivíduo, para caracterizar o estado geral das mudas (Tabela S2).

## 2.2 Características Funcionais

Medimos sete características anatômicas e cinco características funcionais fisiológicas, incluindo a densidade da madeira (Tabela 2). As características anatômicas estão associadas à arquitetura hidráulica das espécies e contribuem para sua resistência à seca. Todas as medições foram realizadas ao final do experimento.

**Tabela 2.** Características anatômicas funcionais relacionadas à arquitetura hidráulica utilizadas neste estudo.

| Características funcionais                      | Unidades                                             | Significado ecológico/funcional                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Área média do vaso (VA)                         | ( $\mu\text{m}^2$ )                                  | Área do vaso relacionada ao transporte de água e nutrientes (Scholz et al., 2013). Está ligada à eficiência no transporte de água.                                                     |
| Diametro hidráulico (Dh)                        | ( $\mu\text{m}$ )                                    | Relacionado à eficiência no transporte de água (Scholz et al., 2013; Apgaua et al., 2016).                                                                                             |
| Fração do lúmen do vaso (F)                     | -                                                    | Um bom indicador da relação entre suporte mecânico e condutividade no uso do espaço da madeira (Scholz et al., 2013; Apgaua et al., 2015).                                             |
| Densidade de vasos (VD)                         | ( $\text{mm}^2$ )                                    | Representa o número de vasos por unidade de área (Scholz et al., 2013).                                                                                                                |
| Índice de agrupamento dos vasos (VG)            | -                                                    | Descritor da conectividade dos vasos (Lens et al., 2011; Scholz et al., 2013; Apgaua et al., 2015).                                                                                    |
| Condutividade teórica específica do xilema (Ks) | ( $\text{Kg m}^{-1} \text{MPa}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) | Relacionado à capacidade de condução do xilema e baseado na lei de Hagen-Poiseuille (Tyree & Zimmerman, 2002). É um traço utilizado para descrever a eficiência no transporte de água. |

### 2.2.1 Anatomia da Madeira

Para avaliar a arquitetura hidráulica, separamos dois segmentos de caule por muda: um segmento localizado entre 5–7 cm da base (mais lignificado) e outro

segmento com dimensões semelhantes do ápice (tecidos menos lignificados) para verificar possíveis alterações entre base e ápice. Os segmentos foram fixados em uma solução contendo 45% de etanol, 40% de água, 10% de formalina e 5% de ácido acético (FAA) a 50%, durante 24 horas para as amostras da base e 48 horas para as amostras do ápice. Em seguida, as amostras foram transferidas para uma solução alcoólica a 50% por 24 horas e, posteriormente, colocadas em uma solução alcoólica a 70% para preservar sua integridade.

Seções histológicas do material mais lignificado foram realizadas com auxílio de um micrótomo manual. Realizamos cortes transversais com espessura de 40 a 100  $\mu\text{m}$  a partir da seção transversal dos segmentos. Após os cortes, o material mais lignificado passou por um processo de clarificação em solução de hipoclorito de sódio ( $\text{NaClO}$ ). Em seguida, o material foi corado com 1% de azul de toluidina e 1% de safranina para contraste das estruturas celulares por 2 minutos. Os excessos de corante foram removidos com água destilada, e a seção foi fixada com xileno ( $\text{C}_8\text{H}_{10}$ ). Após esse procedimento, foram preparadas lâminas semi-permanentes utilizando 50% de glicerina ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ). Para as amostras de tecidos mais jovens, o material foi desidratado em série de tert-butanol ( $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ ), incluído em parafina e seccionado com micrótomo rotativo (Leica RM2245) com espessura de 10–12  $\mu\text{m}$ , seguindo o protocolo de Johansen (1940). As seções foram coradas com Astra Blue e safranina (Gerlach, 1984), e lâminas permanentes foram montadas utilizando Bálsamo do Canadá.

Fotografamos as lâminas com os cortes de ambos os segmentos (ápice e base) utilizando um microscópio com câmera acoplada (Modelo Leica DM6 B, Alemanha). As imagens foram processadas com o software ImageJ, no qual três campos de visão foram selecionados para cada imagem, e uma área de visualização de 1.141  $\mu\text{m}^2$  foi definida, sendo utilizada como padrão para todas as imagens analisadas, a fim de caracterizar a arquitetura hidráulica das espécies com base em um conjunto de características anatômicas funcionais (Tabela 2). A área dos vasos (VA) foi calculada individualmente para cada amostra, e o diâmetro aritmético  $D = \sqrt[3]{(4A/\pi)}$  foi utilizado para o cálculo do diâmetro hidráulico  $[[DH = (D^4/N)]^{0.25}$ , onde N é o número de vasos (Scholz et al., 2013).

A densidade de vasos (VD) foi obtida contando a frequência de vasos em uma

escala de 100  $\mu\text{m}$  (Apgaua et al., 2016; Scholz et al., 2013). A fração do lúmen do vaso (F) foi obtida pelo produto da densidade pela área média do vaso ( $F = VD \times VA$ ) (Cosme et al., 2017). A condutividade hidráulica teórica ( $K_s$ ) foi calculada de acordo com a Lei de Hagen-Poiseuille  $K_s = \pi (\Sigma d^4)/128 \eta A$  (Apgaua et al., 2016; Tyree e Zimmermann, 2002), onde  $\eta$  é a viscosidade da água ( $1,002 \times 10^{-9} \text{ MPa s}^{-1}$ ). O índice de agrupamento dos vasos (VG) foi determinado como a razão entre o número total de vasos e o número de grupos, sendo um grupo definido como um conjunto de dois ou mais vasos em contato entre si ( $VG = N \text{ vasos}/N \text{ grupos}$ ), em que uma razão igual a 1 indica ausência de agrupamentos, e quanto maior o índice, maior o número de agrupamentos presentes (Scholz et al., 2013). Utilizamos VA, Dh e  $K_s$  como medidas de eficiência hidráulica (Mrad et al., 2021; Tyree e Alexander, 1993).

### 2.2.2 Densidade da Madeira

Medimos a densidade básica da madeira (WD,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) utilizando o Princípio de Arquimedes. Para isso, um fragmento de madeira ( $\approx 5 \text{ cm}$ ) foi imerso em água destilada, e o volume da amostra foi calculado com base na massa de água deslocada, assumindo densidade da água igual a  $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ . Em seguida, a amostra foi seca em estufa a  $60\text{--}80^\circ\text{C}$  até atingir peso constante. Calculamos a WD como a razão entre a massa seca e o volume fresco da madeira ( $WD = m/v$ ).

### 2.2.3 Potencial hídrico

Medimos o potencial hídrico uma semana antes do término do experimento, no período das 06:00–07:00, para obter o potencial hídrico pré-dawn ( $\Psi_{PD}$ , MPa), quando a planta está mais hidratada, e ao meio-dia (12:00) para obter o potencial hídrico ao meio-dia ( $\Psi_{MD}$ , MPa), quando a planta está mais desidratada. Para as medições, selecionamos aleatoriamente três mudas por tratamento. Duas folhas foram medidas por indivíduo utilizando uma câmara de pressão de Scholander (Modelo 1505D, PD Instruments).

### 2.2.4 Curva Pressão-Volume

Construímos as curvas pressão–volume ao final do experimento, utilizando três mudas de cada espécie por tratamento. Uma folha foi coletada de cada indivíduo e, em seguida, cortada na base do pecíolo sob água. Após o corte, o pecíolo das folhas foi

mantido imerso em água por 12 horas para recuperação do estado totalmente hidratado. Com as folhas totalmente hidratadas, iniciamos as medições do potencial hídrico ( $\Psi$ ) utilizando uma câmara de pressão de Scholander (Modelo 1505D, PD Instruments) e pesamos as folhas em uma balança digital de precisão (Modelo AD430, precisão 0,001 g) para determinar o peso fresco. Essas medições foram repetidas até que a massa da folha apresentasse variação mínima, indicando consistência entre as medições. Ao final do processo, as folhas foram secas a 60 °C por 48 horas e, em seguida, pesadas. Com essas medições, foi possível estimar as seguintes variáveis: potencial hídrico no ponto de perda de turgor ( $\Psi_{TLP}$ , MPa), módulo de elasticidade ( $E_V$ , MPa) e potencial osmótico de saturação ( $\Psi_S$ , MPa), conforme descrito na metodologia de Bartlett et al. (2012). Como medida de resistência e tolerância à seca, utilizamos o ponto de perda de turgor ( $\Psi_{TLP}$ ) (Kunert et al., 2024; Su et al., 2022).

## 2.2 Análise de Dados

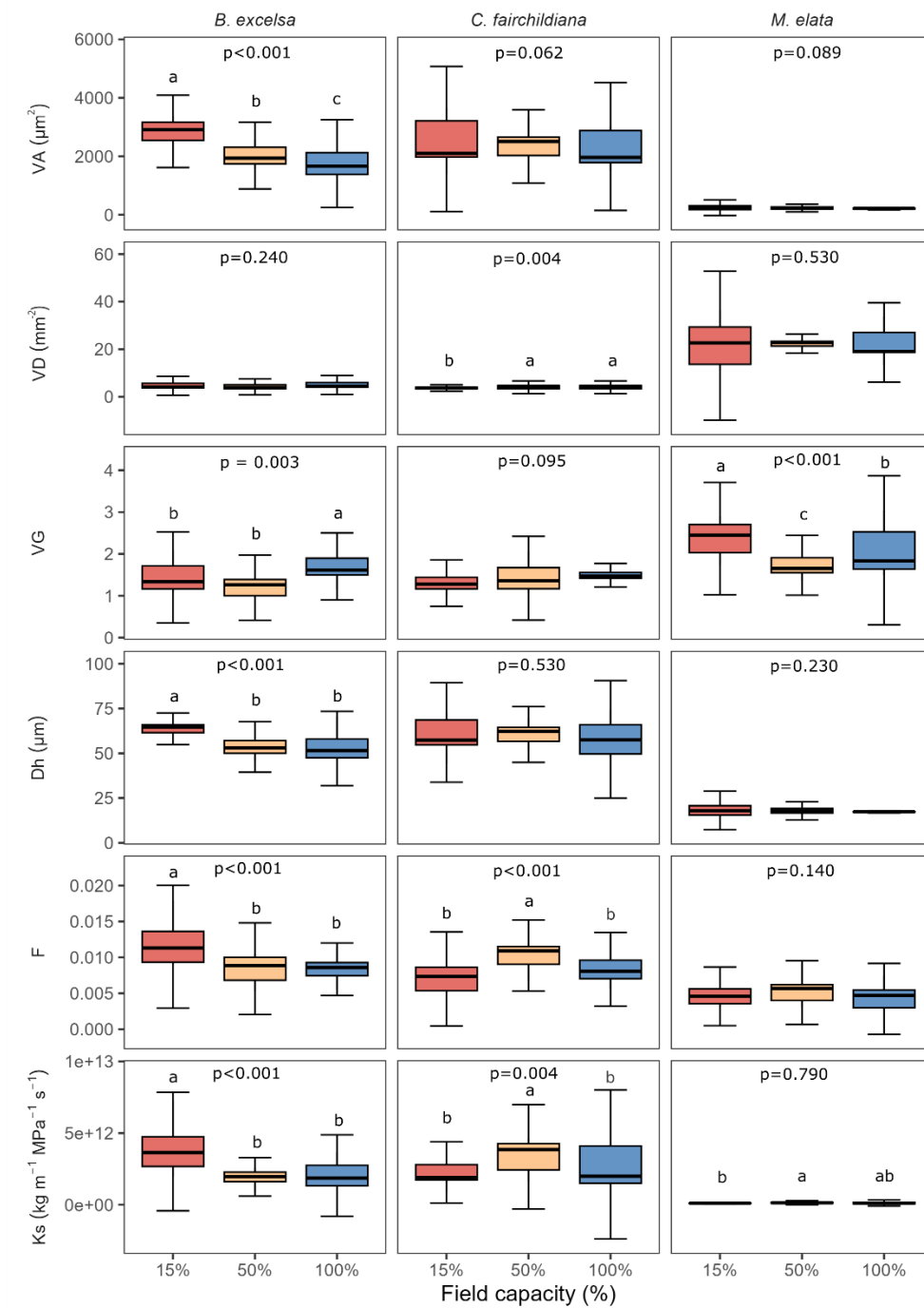
Avaliamos a coordenação dos traços funcionais entre as regiões da base e do ápice utilizando modelos de regressão linear para determinar qual região do caule seria utilizada como parâmetro para quantificar comparações entre os tratamentos. Como os traços da base e do ápice apresentaram forte correlação, utilizamos apenas a base para as análises subsequentes. Testes preliminares incluíram análise de normalidade (Shapiro–Wilk) e homogeneidade de variâncias (Fligner–Killeen) para cada traço hidráulico e anatômico. Os dados não apresentaram distribuição normal, sendo utilizada análise não paramétrica para testar o efeito do tratamento para cada espécie e atributo. Para avaliar a resposta de cada espécie às variações na disponibilidade de água (três tratamentos), utilizamos o teste de Kruskal-Wallis para comparar os valores médios dos traços anatômicos e funcionais fisiológicos entre os tratamentos ao final do experimento, utilizando o pacote *Stats* base do R (R Core Team, 2024). Posteriormente, realizamos testes de Wilcoxon *post-hoc* com valores de  $P$  ajustados pelo método de Bonferroni, considerando nível de significância de  $\alpha = 0,05$ . Para avaliar a coordenação entre os traços funcionais, utilizamos uma Correlação em Matriz com o pacote *corrplot* (Wei e Simko, 2021) associada a diagramas de covariação em rede com o pacote *Igraph* (Csardi e Nepusz, 2006). Correlações  $> 0,5$  foram consideradas fortes associações entre os traços. Para avaliar a centralidade da rede, que representa a importância de cada atributo dentro da rede, calculamos dois indicadores para cada atributo: o grau ( $D$ ), definido como o número de arestas (correlações) que um nó possui, e o grau ponderado ( $D_w$ ), que

corresponde à soma de todos os coeficientes de correlação significativos de um nó (Tabela S3). Para testar o trade-off entre eficiência hidráulica e resistência à seca, utilizamos regressões lineares entre área dos vasos, diâmetro hidráulico e condutividade teórica específica do xilema. Para examinar padrões multivariados de coordenação entre traços anatômicos e fisiológicos, realizamos uma análise de componentes principais (PCA) baseada na matriz de correlação, utilizando a função *princomp* do pacote *vegan* (Oksanen et al., 2024), com dados padronizados. Todas as análises estatísticas e gráficos foram realizados utilizando o *software* estatístico R v.4.4.2 (R Core Team, 2024).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. *Variação nos atributos anatômicos e fisiológicos em resposta à disponibilidade hídrica.*

Os atributos apresentaram alta correlação entre a base e o ápice (Tabela S1); portanto, para simplificar as comparações, os testes do efeito do tratamento nas mudas foram conduzidos utilizando apenas a base do caule. As três espécies estudadas mostraram ajustes em seus traços anatômicos e fisiológicos em resposta à disponibilidade de água testada pela capacidade de campo nos vasos (*Field capacity* - FC). Para *B. excelsa*, todos os traços anatômicos diferiram significativamente entre os tratamentos, exceto VD ( $P = 0,24$ ) (Figura 2). A fração do lúmen do vaso (F) ( $P < 0,001$ ) e a condutividade hidráulica teórica ( $K_s$ ) ( $P < 0,001$ ) foram maiores no tratamento com 15% da capacidade de campo, diferindo significativamente de 50% FC e 100% FC, que não diferiram entre si. A área do vaso (VA) apresentou diferenças entre todos os tratamentos ( $P < 0,001$ ), sendo maior em 15% FC. O índice de agrupamento dos vasos (VG) apresentou valores mais altos no tratamento de 100% FC em comparação com os demais tratamentos ( $P = 0,003$ ), não havendo diferenças entre 15% FC e 50% FC para *B. excelsa* (Figura 2).

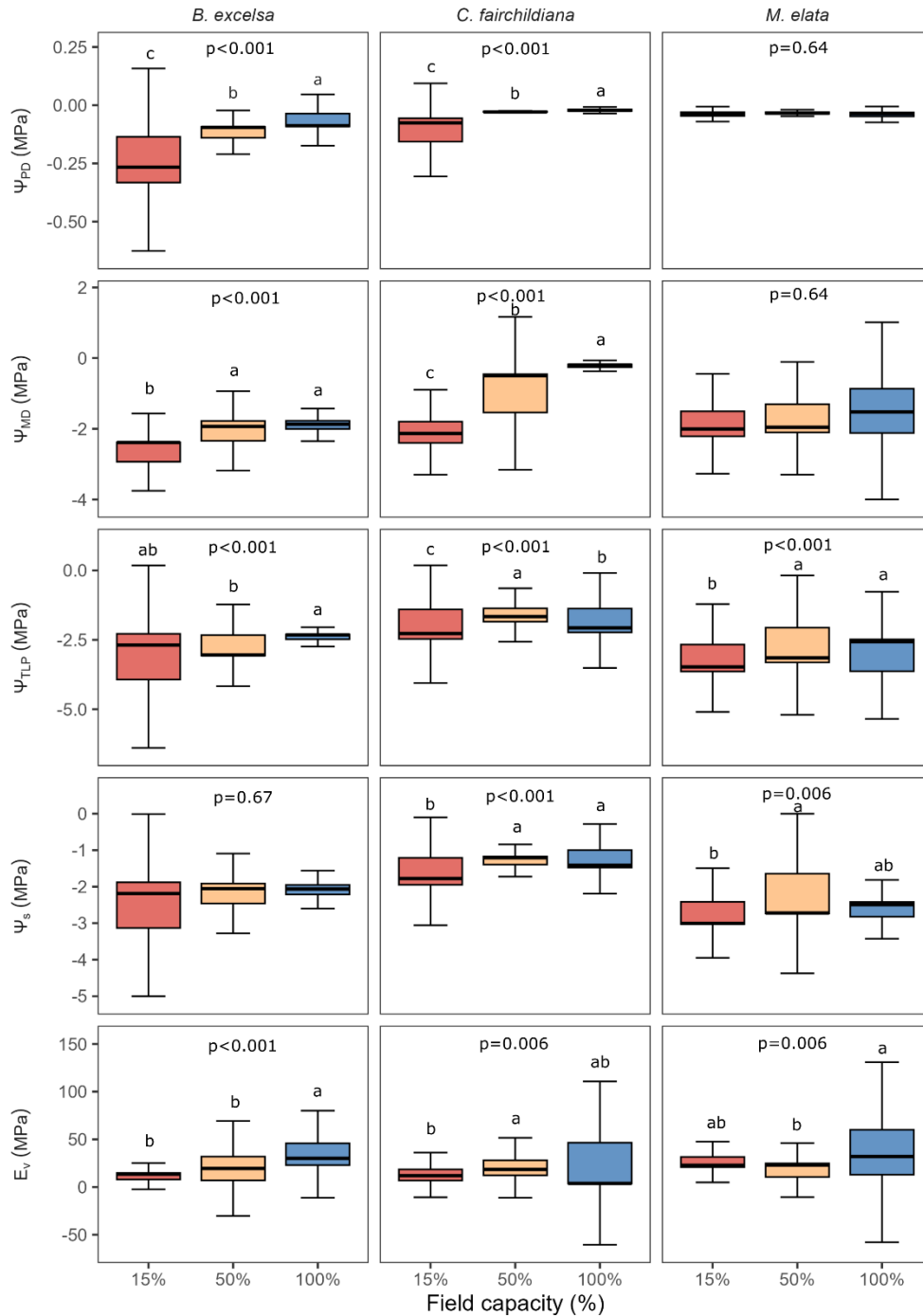


**Figura 2.** Traços anatômicos da base do caule das espécies *Clitoria fairchildiana*, *Manilkara elata* e *Bertholletia excelsa* entre os tratamentos T1 (15% da capacidade de campo, vermelho), T2 (50%, laranja) e T3 (100%, azul), após 120 dias de experimento. Os traços anatômicos incluem VA (área do vaso), VD (densidade de vasos), VG (índice de agrupamento dos vasos), Dh (diâmetro hidráulico dos vasos), F (fração do lúmen do vaso) e Ks (condutividade teórica do xilema). Os dados foram analisados utilizando o teste de Kruskal-Wallis, seguido de testes de Wilcoxon post-hoc com valores de  $p$  ajustados pelo método de Bonferroni ( $\alpha = 0,05$ ). O tamanho da amostra consistiu em seis indivíduos por tratamento. Diferenças entre os tratamentos estão indicadas por letras minúsculas.

*Bertholletia excelsa* apresentou diferenças entre os tratamentos de disponibilidade de água em todos os traços fisiológicos avaliados, exceto para  $\Psi_S$  (Figura 3). Para esta espécie, os menores valores de  $\Psi_{PD}$  ( $P < 0,001$ ) e  $\Psi_{MD}$  ( $P < 0,001$ ) foram registrados no tratamento de 15% FC, diferindo dos demais tratamentos. O  $\Psi_{TLP}$  foi mais negativo no tratamento de 50% FC, diferindo dos outros tratamentos, 15% FC e 100% FC ( $P < 0,001$ ). O potencial osmótico ( $\Psi_S$ ) foi semelhante entre os tratamentos, enquanto o Ev apresentou diferenças entre os tratamentos ( $P < 0,001$ ), com valores mais altos no tratamento de 100% FC em comparação a 15% FC e 50% FC (Figura 3).

Para *C. fairchildiana*, os traços anatômicos apresentaram diferenças em F, VD e Ks entre os tratamentos, enquanto os demais traços não apresentaram diferenças significativas (Figura 2). Para F ( $P < 0,001$ ) e Ks ( $P = 0,004$ ), o tratamento com 50% da capacidade de campo diferiu dos outros tratamentos, apresentando médias elevadas, mas não foram encontradas diferenças significativas entre 15% FC e 100% FC. VD foi menor em 15% FC, diferindo ( $P = 0,004$ ) de 50% FC e 100% FC (Figura 2).

*Clitoria fairchildiana* apresentou diferenças significativas em  $\Psi_{PD}$ ,  $\Psi_{MD}$ , Ev,  $\Psi_S$  e  $\Psi_{TLP}$  entre os tratamentos (Figura 3).  $\Psi_{PD}$  ( $P < 0,001$ ) e  $\Psi_{MD}$  ( $P < 0,001$ ) variaram entre todos os tratamentos, sendo os valores mais negativos observados no tratamento com menor disponibilidade de água, 15% FC. Para esta espécie, Ev diferiu entre os tratamentos de 15% FC e 50% FC ( $P = 0,006$ ), com 15% FC apresentando os menores valores. O tratamento de 100% FC não diferiu dos demais tratamentos em Ev.  $\Psi_S$  foi menor em 15% FC em comparação a 50% FC e 100% FC ( $P < 0,001$ ), não havendo diferenças entre 50% FC e 100% FC. Observamos diferenças entre todos os tratamentos para  $\Psi_{TLP}$  ( $P < 0,001$ ), com os valores mais negativos encontrados nos tratamentos de 15% FC e 100% FC em relação a 50% FC (Figura 3).



**Figura 3.** Traços fisiológicos das espécies *Clitoria fairchildiana*, *Manilkara elata* e *Bertholletia excelsa* entre os tratamentos T1 (15% da capacidade de campo, vermelho), T2 (50%, laranja) e T3 (100%, azul), após 120 dias de experimento. Os traços fisiológicos analisados incluem:  $\Psi_{PD}$  (potencial hídrico pré-dawn),  $\Psi_{MD}$  (potencial hídrico ao meio-dia),  $\Psi_{TLP}$  (ponto de perda de turgor),  $\Psi_s$  (potencial osmótico) e  $E_v$  (módulo de elasticidade). Os dados foram analisados utilizando o teste de Kruskal-Wallis, seguido de testes de Wilcoxon post-hoc com valores de  $p$  ajustados pelo método de Bonferroni ( $\alpha = 0,05$ ). Tamanho da amostra: três indivíduos por tratamento. Diferenças entre os tratamentos estão indicadas por letras minúsculas.

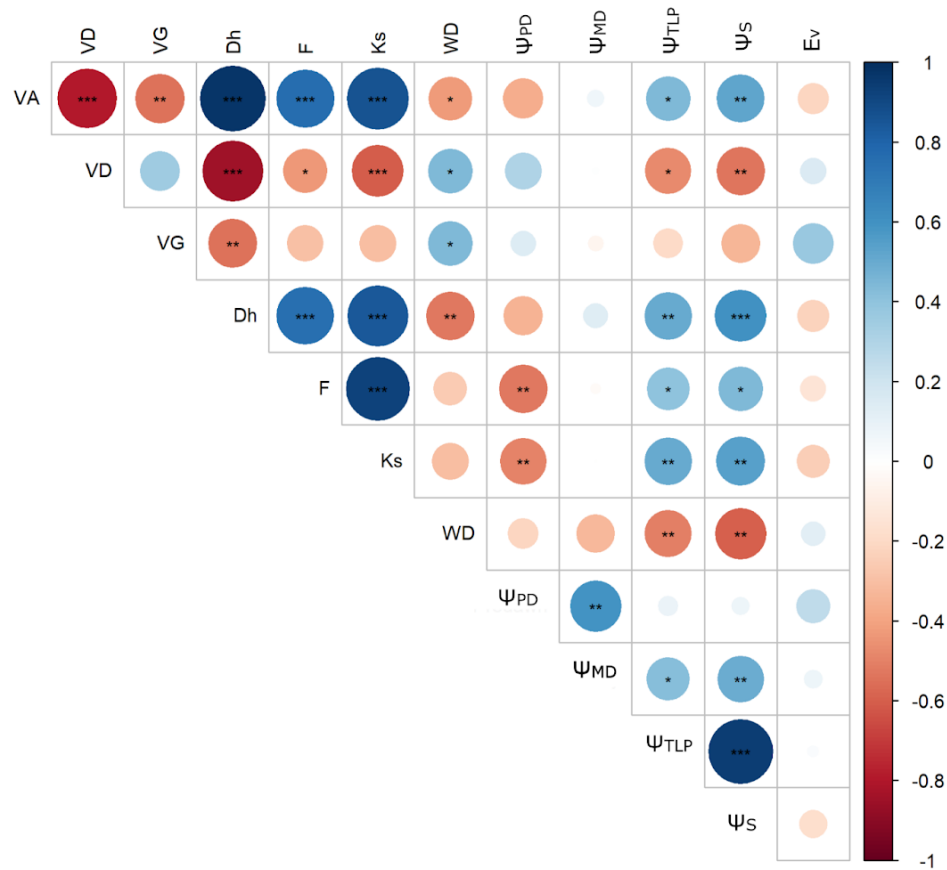
*Manilkara elata* foi a espécie que apresentou menor variação nos atributos entre os tratamentos, com diferenças observadas apenas para o índice de agrupamento dos vasos (VG) ( $P < 0,001$ ). Indivíduos no tratamento com 15% da capacidade de campo apresentaram VG mais alto, enquanto menor agrupamento foi observado em 50% FC e 100% FC (Figura 2).

Em relação aos atributos fisiológicos, para *M. elata*,  $\Psi_{TLP}$ ,  $\Psi_S$  e  $E_v$  diferiram entre os tratamentos (Figura 3), enquanto  $\Psi_{PD}$  ( $P = 0,064$ ) e  $\Psi_{MD}$  ( $P = 0,063$ ) não apresentaram diferenças entre os tratamentos. Para  $\Psi_{TLP}$  ( $P < 0,001$ ), os indivíduos em 15% FC apresentaram o potencial mais negativo, diferindo de 50% FC e 100% FC, que não diferiram entre si.  $\Psi_S$  variou entre 15% FC e 50% FC ( $P = 0,006$ ), com 15% FC apresentando os valores mais negativos.  $E_v$  ( $P = 0,006$ ) foi maior em 100% FC, diferindo apenas de 50% FC (Figura 3).

### **3.2. Coordenação entre atributos fisiológicos foliares, densidade da madeira e atributos anatômicos da arquitetura hidráulica.**

A densidade da madeira diferiu entre as espécies estudadas ( $P < 0,001$ ), sendo *M. elata* a espécie com maior densidade em comparação à *C. fairchildiana* e *B. excelsa*, que não diferiram entre si (Figura S3).

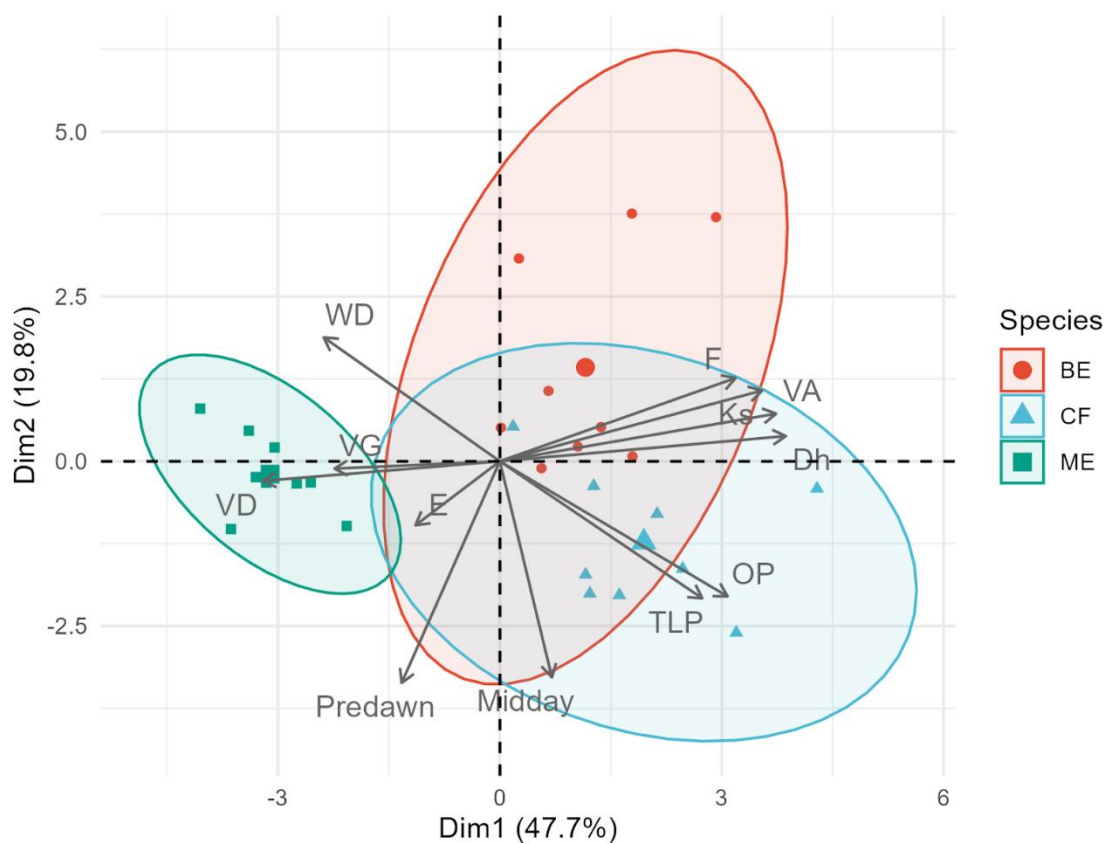
Os atributos anatômicos hidráulicos apresentaram fortes correlações entre si ( $r > 0,50$ ) (Figura 4; Figura S2). Observou-se correlação negativa significativa entre WD e Dh ( $r = -0,50$ ),  $\Psi_{PD}$  com F ( $r = -0,50$ ) e Ks ( $r = -0,50$ ).  $\Psi_{TLP}$  apresentou correlação positiva com Dh ( $r = 0,50$ ), Ks ( $r = 0,50$ ) e  $\Psi_S$  ( $r = 0,90$ ) e correlação negativa com VD ( $r = -0,50$ ) e WD ( $r = -0,50$ ).  $\Psi_S$  correlacionou-se positivamente com VA ( $r = 0,50$ ), Dh ( $r = 0,60$ ), Ks ( $r = 0,50$ ) e  $\Psi_{MD}$  ( $r = 0,50$ ), enquanto apresentou correlações negativas com VD ( $r = -0,50$ ) e WD ( $r = -0,60$ ).  $E_v$  não apresentou correlações significativas nem com atributos anatômicos nem fisiológicos (Figura 4).



**Figura 4.** Matriz de correlação entre os atributos anatômicos e fisiológicos das espécies estudadas, em que correlações positivas são indicadas em tons de azul e correlações negativas em tons de vermelho. A significância estatística é indicada por asteriscos (\* para  $p < 0,05$ , \*\* para  $p < 0,01$ , \*\*\* para  $p < 0,001$ ). Correlações com  $r > 0,5$  foram consideradas fortes. Os atributos incluídos são VA (área dos vasos), VG (índice de agrupamento dos vasos), VD (densidade dos vasos), Ks (condutividade teórica específica do xilema), Dh (diâmetro hidráulico dos vasos), F (fração do lúmen do vaso), WD (densidade da madeira),  $\Psi_{TLP}$  (ponto de perda de turgor),  $\Psi_{PD}$  (potencial hídrico pré-dawn),  $\Psi_{MD}$  (potencial hídrico ao meio-dia),  $\Psi_S$  (potencial osmótico) e Ev (módulo de elasticidade).

Para visualizar a distribuição dos atributos fisiológicos das folhas, densidade da madeira e arquitetura hidráulica do caule, realizamos uma Análise de Componentes Principais (PCA), que explicou 47,7% da variação ao longo do primeiro eixo e 19,8% ao longo do segundo eixo, totalizando 67,5% da variação geral (Figura 5). O eixo 1 refletiu associações positivas com VA, Dh, Ks, F,  $\Psi_S$  e  $\Psi_{TLP}$ , e associações negativas com WD, VG e VD. O eixo 2 foi principalmente influenciado por  $\Psi_{PD}$  e  $\Psi_{MD}$ . *Bertholletia excelsa* e *C. fairchildiana* se agruparam, mostrando associações mais

fortes com atributos de eficiência hidráulica, enquanto *M. elata* se separou, associando-se a maior densidade da madeira e dos vasos (Figura 5).



**Figura 5.** Biplot de PCA dos atributos anatômicos e fisiológicos de mudas sob diferentes níveis de disponibilidade de água no solo. Os dois primeiros eixos explicam 67,5% da variância total (Dim1: 47,7%, Dim2: 19,8%). As setas indicam as contribuições de todos os atributos incluídos:  $TLP = \Psi_{TLP}$  (ponto de perda de turgor),  $Predawn = \Psi_{PD}$  (potencial hídrico pré-dawn),  $Midday = \Psi_{MD}$  (potencial hídrico ao meio-dia),  $OP = \Psi_s$  (potencial osmótico),  $E = E_v$  (módulo de elasticidade),  $WD$  (densidade da madeira),  $VA$  (área dos vasos),  $VG$  (índice de agrupamento dos vasos),  $VD$  (densidade dos vasos),  $K_s$  (condutividade teórica específica do xilema),  $D_h$  (diâmetro hidráulico dos vasos) e  $F$  (fração do lúmen do vaso). Cada ponto representa uma amostra individual, agrupada por espécie e delimitada por elipses de confiança coloridas: *Bertholletia excelsa* (BE), *Clitoria fairchildiana* (CF) e *Manilkara elata* (ME).

A relação entre os atributos de eficiência hidráulica e o Ponto de Perda de Turgor ( $\Psi_{TLP}$ ) variou entre as espécies (Tabela 3). Para *C. fairchildiana*, foram encontradas relações positivas significativas para  $VA$  ( $R^2 = 0,522$ ,  $P = 0,028$ ) e  $K_s$  ( $R^2 = 0,576$ ,  $P = 0,018$ ), e uma relação marginal para  $D_h$  ( $R^2 = 0,400$ ,  $P = 0,068$ ). Para *M. elata* e *B. excelsa*, não foram observadas

relações significativas.

**Tabela 3.** Resultados da regressão linear entre o Ponto de Perda de Turgor ( $\Psi_{TLP}$ ) e os atributos de eficiência hidráulica: Área dos Vasos (VA), Diâmetro Hidráulico (Dh) e Condutividade Teórica Específica (Ks) para três espécies. Valores de P significativos ( $P < 0,05$ ) estão destacados em negrito com um asterisco (\*).

| Espécies                      | Atributos | Intercepto | Coeficiente angular | R <sup>2</sup> | P-value       |
|-------------------------------|-----------|------------|---------------------|----------------|---------------|
| <i>Bertholletia excelsa</i>   | VA        | 7.520      | -0.107              | 0.047          | 0.577         |
|                               | Dh        | 4.020      | -0.024              | 0.011          | 0.784         |
|                               | Ks        | 29.232     | 0.194               | 0.055          | 0.545         |
| <i>Clitoria fairchildiana</i> | VA        | 8.658      | 0.493               | 0.522          | <b>0.028*</b> |
|                               | Dh        | 4.541      | 0.242               | 0.400          | 0.068         |
|                               | Ks        | 30.651     | 1.109               | 0.576          | <b>0.018*</b> |
| <i>Manilkara elata</i>        | VA        | 4.911      | -0.165              | 0.166          | 0.276         |
|                               | Dh        | 2.652      | -0.071              | 0.150          | 0.304         |
|                               | Ks        | 23.862     | -0.507              | 0.421          | 0.059         |

## 4. DISCUSSÃO

Demonstramos que as três espécies estudadas exibiram ajustes distintos às variações na disponibilidade de água, tanto nos atributos anatômicos quanto nos fisiológicos. *Manilkara elata*, que possui alta densidade da madeira, apresentou menores mudanças em seus atributos, enquanto *Clitoria fairchildiana* e *Bertholletia excelsa*, ambas com menor densidade da madeira, mostraram maiores variações, cada uma empregando diferentes estratégias. *Clitoria fairchildiana* adota uma estratégia mais segura, enquanto *B. excelsa* segue uma mais arriscada. *Clitoria fairchildiana* apresentou um trade-off entre eficiência hidráulica e resistência à seca, avaliado pelo ponto de perda de turgor.

### 4.1. *Variações nas características hidráulicas em resposta à disponibilidade de água.*

As três espécies estudadas responderam de forma distinta à limitação hídrica, modulando atributos anatômicos para promover eficiência ou segurança hidráulica (Figura 2). *Bertholletia excelsa* aumentou a eficiência hidráulica sob condições de seca, enquanto *Clitoria fairchildiana* apresentou ajustes priorizando a segurança hidráulica. Em contraste, os indivíduos de *Manilkara elata* mostraram menos ajustes em sua arquitetura hidráulica. Assim, nossos achados demonstram diferentes estratégias relacionadas aos mecanismos hidráulicos adotados pelas espécies para lidar e se ajustar a variações significativas na disponibilidade de água. Esses ajustes intraespecíficos ainda permanecem pouco claros, e aqui destacamos respostas distintas tanto em nível intraespecífico quanto interespecífico. Em escalas globais, regiões com uma estação de crescimento mais longa, como as florestas tropicais, apresentam maior condutividade hidráulica específica do xilema do que regiões com climas mais secos e estações de crescimento mais curtas (He et al., 2020; Li et al., 2023). Em escala regional, comunidades vegetais em florestas tropicais amazônicas com menor sazonalidade exibiram atributos relacionados a maior eficiência hidráulica (Barros et al., 2019). Em escala local, em áreas como platôs e vales na Floresta Amazônica, espécies de platôs (com menor disponibilidade hídrica) apresentaram atributos associados à segurança hidráulica, como menor área média de vasos, menor diâmetro hidráulico médio de vasos e menor área de alburno em comparação às espécies de vales (Cosme et al., 2017). Aqui, demonstramos que, em nível individual e de espécie, as espécies podem adotar diferentes estratégias para lidar com a seca, embora sigam

padrões semelhantes aos observados nos estudos mencionados anteriormente.

A limitação hídrica afetou os atributos associados a maior eficiência hidráulica em *C. fairchildiana*, com menores valores de fração do lúmen (F), condutividade hidráulica teórica (Ks) e densidade de vasos (VD) (Figura 2). A redução de F limita o fluxo de água, mas aumenta a segurança hidráulica ao diminuir a pressão no xilema e reduzir o risco de falha hidráulica (Hacke et al., 2017; McCulloh et al., 2011). Em condições de seca, algumas espécies tropicais podem apresentar vasos mais estreitos, menor agrupamento de vasos e maior conteúdo de fibras – estratégias que aumentam a segurança hidráulica, embora reduzam a eficiência do transporte de água (Tng et al., 2018). Esses ajustes ajudam a minimizar a perda de água e a proteger o sistema hidráulico da planta (Hugalde et al., 2020; Poorter et al., 2019; Sperry et al., 2003). *Clitoria fairchildiana* é uma espécie de baixa densidade da madeira e decídua, o que significa que perde suas folhas para evitar a perda de água por transpiração em um período durante a estação seca, funcionando como um “fusível hidráulico” para proteger o xilema e reduzir a dessecação (Wolfe et al., 2016). Portanto, embora *C. fairchildiana* seja uma espécie decídua com estratégia de escape à seca, os indivíduos ajustam seus atributos hidráulicos durante o período em que estão funcionalmente ativos, evitando o risco de falha hidráulica quando a disponibilidade de água diminui (Figura 2).

Por outro lado, indivíduos de *B. excelsa* adotaram uma estratégia mais arriscada sob limitação hídrica, com ajustes na arquitetura hidráulica que aumentaram a eficiência do transporte de água (Avila et al., 2022; Quintana-Pulido et al., 2018). O maior VA e o aumento do Dh favorecem o incremento de Ks (Figura 2), permitindo um transporte de água mais eficiente (Hacke et al., 2017; Scholz et al., 2013; Tng et al., 2018), em uma tentativa de manter o fornecimento hídrico necessário para a sobrevivência do indivíduo. Embora essa possa ser uma estratégia vantajosa em ambientes com seca sazonal, ela também pode comprometer a sobrevivência do indivíduo durante secas mais severas, já que maior eficiência também aumenta a vulnerabilidade do xilema à embolia (Sperry et al., 2017). Além disso, a espécie também apresentou redução no VG em condições de seca (Figura 2), o que dificulta vias alternativas para o transporte de água (Hölttä et al., 2009; Loepfe et al., 2007), tornando a espécie ainda mais vulnerável, uma vez que vasos agrupados permitem um fluxo de água de desvio eficiente (Zanne et al., 2010; Zhao, 2016). Portanto,

acreditamos que esses ajustes podem ter sido uma estratégia para compensar a baixa disponibilidade de água no solo, dada a demanda hídrica da planta, mas acarretam maiores riscos sob condições de seca prolongada.

A espécie com maior densidade da madeira, *M. elata*, apresentou menor variação na arquitetura hidráulica do xilema (Figura 2). Essa espécie ajustou seu VG, exibindo valores mais elevados no tratamento com menor disponibilidade de água (15% CC), sugerindo uma tentativa de melhorar a conectividade dos vasos. Tyree e Zimmermann (2002) e Lens et al. (2011) sugerem que um maior agrupamento de vasos aumenta a segurança do xilema. Apesar dos ajustes no agrupamento de vasos, não houve alteração direta na condutividade hidráulica teórica (Zanne et al., 2010). Essa espécie possui madeira mais densa ( $0,593 \pm 0,009 \text{ g cm}^{-3}$ ), o que pode ter resultado em menor Ks (cf. Fig. 3) e maior segurança hidráulica (Chave et al., 2009; Gleason et al., 2016; Hacke e Sperry, 2001). Além disso, segue uma estratégia de crescimento mais lento (Reich, 2014), favorecendo a conservação de recursos e levando a menor variação nos atributos anatômicos em resposta às flutuações na disponibilidade hídrica.

#### **4.2. Variação nos atributos fisiológicos em resposta à disponibilidade de água.**

As três espécies estudadas modificaram seus atributos fisiológicos funcionais e estratégias para lidar com as variações na disponibilidade de água impostas pelos tratamentos. O potencial hídrico foliar indicou a limitação hídrica enfrentada pelas espécies nos tratamentos analisados, com *C. fairchildiana* e *B. excelsa* apresentando potenciais significativamente mais negativos sob o tratamento com menor disponibilidade de água. Em contraste, *M. elata* mostrou menor variação no potencial hídrico, tanto no predawn ( $\Psi_{PD}$ ) quanto ao meio-dia ( $\Psi_{MD}$ ) (Figura 3). As implicações ecológicas dessa variação no potencial hídrico foliar são muito importantes, pois determinam o estado hídrico das plantas e influenciam o risco de falha hidráulica (Martínez-Vilalta e Garcia-Forner, 2016). Entre as três espécies, *M. elata* é uma espécie perene que apresenta taxas de crescimento mais lentas e maior densidade da madeira (Reich, 2014). A ausência de variação no potencial hídrico pode estar associada a um controle estomático mais rigoroso (por exemplo, condutância estomática). Em escalas de tempo curtas, a regulação estomática é o principal mecanismo usado pelas plantas para limitar a transpiração, mantendo o potencial hídrico dentro de limites toleráveis (Martínez-Vilalta e Garcia-Forner, 2016). A

arquitetura hidráulica também influencia a dinâmica do potencial hídrico, já que a queda do potencial hídrico na planta depende da razão entre as taxas de transpiração e a capacidade de transporte hidráulico (Martínez-Vilalta et al., 2014; Martínez-Vilalta e Garcia-Forner, 2016).

Foram observados ajustes nos tecidos, como a redução do ponto de perda de turgor ( $\Psi_{TLP}$ ), nas três espécies estudadas (Figura 3), representando uma estratégia importante para a manutenção das funções metabólicas sob estresse hídrico. O  $\Psi_{TLP}$  representa o potencial hídrico no qual as células foliares murcham; geralmente, nesse ponto, as plantas fecham os estômatos, cessam a troca gasosa e interrompem o crescimento (Bartlett et al., 2014; Blackman et al., 2010; Brodribb e Holbrook, 2003). A plasticidade nesse atributo pode ser uma estratégia crucial, permitindo que as plantas mantenham funções vitais sob condições de limitação hídrica (Bartlett et al., 2014). Isso parece ser uma estratégia importante para plântulas de árvores tropicais.

As alterações no  $\Psi_{TLP}$  no tratamento de seca com 15% da capacidade de campo são impulsionadas principalmente por mudanças na concentração de solutos, ou seja, ajustes osmóticos (Bartlett et al., 2014, 2012). O potencial osmótico ( $\Psi_s$ ) variou significativamente entre os tratamentos em *Clitoria fairchildiana* e *Manilkara elata*, tornando-se mais negativo sob déficit hídrico (Figura 3). Essa redução indica um ajuste osmótico eficiente para manter a hidratação celular, utilizando a regulação osmótica para prevenir a desidratação e sustentar as funções metabólicas e o crescimento sob limitação de água, diminuindo o  $\Psi_{TLP}$  (Meinzer et al., 2009; Tyree e Zimmermann, 2002).

O módulo de elasticidade ( $E_v$ ) diminuiu em todas as espécies no tratamento com menor disponibilidade de água (Figura 3), indicando menor rigidez celular para suportar a desidratação. Os ajustes no  $E_v$  também contribuem para variações no  $\Psi_{TLP}$  (Bartlett et al., 2014) sob condições de déficit hídrico, como observadas em outras espécies (Saito e Terashima, 2004). Assim, os ajustes no  $E_v$  tornam-se vantajosos para as espécies em condições de seca, pois contribuem para a manutenção do turgor das células foliares (Kozłowski et al., 1990).

### 4.3. Relação entre os atributos

As relações entre os atributos evidenciam estratégias específicas de cada espécie; para melhor compreender esses padrões, realizamos uma análise multivariada, que revelou que as duas espécies com menor densidade da madeira, *Bertholletia excelsa* e *Clitoria fairchildiana*, estavam associadas a atributos anatômicos relacionados à eficiência hidráulica, ponto de perda de turgor ( $\Psi_{TLP}$ ) e potencial osmótico ( $\Psi_s$ ) (Figura 5). Essas duas espécies também apresentaram maior variação intraespecífica do que *Manilkara elata*, que estava mais associada à densidade da madeira (WD) e ao índice de agrupamento dos vasos (VG). Essa maior plasticidade nas duas espécies com menor densidade da madeira pode estar relacionada a uma estratégia de crescimento mais rápido, apesar de *B. excelsa* ser perene e *C. fairchildiana* decídua (Reich, 2014). Em contraste, *M. elata*, uma espécie tardia com alta densidade da madeira, apresenta uma estratégia de crescimento mais lenta e menor plasticidade em seus atributos. Assim, nossos resultados reforçam que os ajustes nos atributos das plantas estão ligados à estratégia ecológica de toda a planta e à forma como ela lida com a seca.

Como esperado, os atributos anatômicos mostraram forte correlação entre si (Figura 4). Além disso, demonstramos que apenas alguns atributos anatômicos do caule se correlacionam com atributos fisiológicos. Observamos alta correlação entre  $\Psi_s$  e atributos anatômicos, como área dos vasos (VA), diâmetro hidráulico (Dh) e condutividade teórica do xilema (Ks), indicando que a capacidade de ajuste osmótico está coordenada com a eficiência no transporte de água. Também verificamos coordenação entre Dh e WD, conforme descrito em estudos anteriores (Hoeber et al., 2014; Méndez-Alonzo et al., 2012). No entanto, Hoeber et al. (2014) sugeriram que essa coordenação entre Dh e WD é evidente quando a planta está sob limitação hídrica, enquanto em estudos em florestas tropicais úmidas, onde há maior disponibilidade de água, a mesma coordenação não foi observada (Poorter et al., 2010; Schuldt et al., 2013). A relação negativa entre WD e  $\Psi_{TLP}$  e  $\Psi_s$  sugere que espécies com madeira densa podem ter menor capacidade de ajuste tecidual. Esse fenômeno está relacionado ao fato de que a madeira densa limita a capacidade de armazenamento de água, dificultando o ajuste osmótico das plantas (Guzman et al., 2021; Savi et al., 2017).

Identificamos um trade-off entre eficiência hidráulica (determinada por atributos anatômicos) e resistência à seca (ponto de perda de turgor) para *Clitoria fairchildiana* (Tabela 3), enquanto esse padrão não foi significativo para *Manilkara elata* e *Bertholletia excelsa*. Isso sugere que a espécie decídua *C. fairchildiana* pode adotar uma estratégia de transporte de água mais arriscada e uma abordagem de evasão da seca que prioriza a eficiência hidráulica, um padrão também observado em outras espécies decíduas em diferentes ambientes florestais (Aritsara et al., 2023; Li et al., 2023). Assim, nossos resultados reforçam a natureza específica do trade-off entre eficiência e segurança nas espécies, com a disponibilidade de água desempenhando um papel central na modulação dessas relações. Nosso estudo evidencia a complexidade das estratégias adotadas por diferentes espécies tropicais sob condições semelhantes de disponibilidade de água e ambientais, destacando como elas equilibram transporte de água eficiente versus seguro por meio da coordenação de atributos.

Compreender como as espécies respondem à seca é crucial para a seleção de plantas mais adaptáveis para projetos de restauração, garantindo a resiliência dos ecossistemas diante das mudanças climáticas. Considerando como a disponibilidade de água influencia a coordenação entre atributos anatômicos e fisiológicos nas plantas, esse conhecimento pode promover iniciativas de reflorestamento mais sustentáveis e melhorar o desempenho das plantações (Guarnaschelli et al., 2012). Espécies decíduas com baixa densidade da madeira, como *Clitoria fairchildiana*, podem apresentar ajustes em seus atributos e evitar a seca ao perderem suas folhas, tornando-as adequadas para áreas com estresse hídrico periódico. *Bertholletia excelsa*, por outro lado, apresentou uma estratégia mais arriscada e pode ser mais vulnerável sob condições de seca intensa e prolongada, o que a torna menos recomendável para regiões com eventos de seca frequentes. Em contraste, espécies como *Manilkara elata*, com maior densidade de madeira e uma estratégia mais conservadora, podem ser essenciais para áreas sujeitas a déficits hídricos recorrentes, contribuindo para a resiliência do ecossistema. Esse trade-off entre eficiência e resistência à seca ressalta a complexidade na escolha de espécies que se alinhem às condições ambientais específicas.

## 5. CONCLUSÃO

Nossos resultados proporcionam uma melhor compreensão das estratégias das plantas para lidar com variações na disponibilidade de água, considerando a arquitetura hidráulica. A coordenação entre atributos anatômicos e fisiológicos pode garantir a sobrevivência das espécies, refletindo diferentes estratégias para enfrentar o déficit hídrico. Observamos um trade-off entre atributos anatômicos relacionados à eficiência no transporte de água, especialmente VA (área dos vasos), Dh (diâmetro hidráulico dos vasos), Ks (condutividade teórica do xilema) e  $\Psi_{TLP}$  (ponto de perda de turgor). Esses resultados indicam que as espécies podem se beneficiar de ajustes morfofisiológicos que favorecem a manutenção do turgor celular e reduzem o risco de embolia, contribuindo para sua sobrevivência em condições de estresse hídrico severo. Compreender como diferentes espécies se ajustam ao déficit hídrico pode auxiliar na seleção mais eficiente de mudas em projetos de restauração de áreas degradadas, além de fornecer subsídios para estimar a taxa de sobrevivência dessas espécies diante de mudanças na disponibilidade hídrica ambiental.

## 6. ACKNOWLEDGEMENTS

We are grateful for the following financial support: Stefany P. R. Figueiredo was supported with a Master's scholarship by the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) and Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brazil (CAPES) - Finance Code 001; Hydro Norsk for the project financial support, with project coordinated by Thaisa Sala Michelan; GST acknowledges CNPq for the productivity fellowship (Process number: 304591/2022-0); GST is also grateful to L'Oréal-UNESCO-ABC Para Mulheres na Ciência/For Women in Science grant. C.S.-M. acknowledges the support from the European Research Council (ERC) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation program (grant agreement No 865403).

## 7. REFERÊNCIAS

- Allen, C.D., Breshears, D.D., McDowell, N.G., 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* 6, 1–55. <https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1>
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., de Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Álvarez-Cansino, L., Comita, L.S., Jones, F.A., Manzané-Pinzón, E., Browne, L., Engelbrecht, B.M.J., 2022. Turgor loss point predicts survival responses to experimental and natural drought in tropical tree seedlings. *Ecology* 103. <https://doi.org/10.1002/ecy.3700>
- Apgaua, D.M.G., Ishida, F.Y., Tng, D.Y.P., Laidlaw, M.J., Santos, R.M., Rumman, R., Eamus, D., Holtum, J.A.M., Laurance, S.G.W., 2015. Functional traits and water transport strategies in lowland tropical rainforest trees. *PLoS One* 10, e0130799. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130799>
- Apgaua, D.M.G., Tng, D.Y.P., Cernusak, L.A., Cheesman, A.W., Santos, R.M., Edwards, W.J., Laurance, S.G.W., 2016. Plant functional groups within a tropical forest exhibit different wood functional anatomy. *Functional Ecology* 31, 582–591. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12787>
- Aritsara, A.N.A., Ni, M.Y., Wang, Y.Q., Yan, C.L., Zeng, W.H., Song, H.Q., Cao, K.F., Zhu, S.D., 2023. Tree growth is correlated with hydraulic efficiency and safety across 22 tree species in a subtropical karst forest. *Tree Physiology* 43, 1307–1318. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpad050>
- Avila, R.T., Kane, C.N., Batz, T.A., Trabi, C., Damatta, F.M., Jansen, S., McAdam, S.A.M., 2022. The relative area of vessels in xylem correlates with stem embolism resistance within and between genera. *Tree Physiology* 43, 75–87. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpac110>
- Barros, F. V., Bittencourt, P.R.L., Brum, M., Restrepo-Coupe, N., Pereira, L., Teodoro, G.S., Saleska, S.R., Borma, L.S., Christoffersen, B.O., Penha, D., Alves, L.F., Lima, A.J.N., Carneiro, V.M.C., Gentine, P., Lee, J.E., Aragão, L.E.O.C., Ivanov, V., Leal, L.S.M., Araujo, A.C., Oliveira, R.S., 2019. Hydraulic traits explain differential responses of Amazonian forests to the 2015 El Niño-induced drought. *New Phytologist* 223, 1253–1266. <https://doi.org/10.1111/nph.15909>
- Bartlett, M.K., Scoffoni, C., Sack, L., 2012. The determinants of leaf turgor loss point and prediction of drought tolerance of species and biomes: A global meta-analysis. *Ecology Letters* 15, 393–405. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01751.x>
- Bartlett, M.K., Zhang, Y., Kreidler, N., Sun, S., Ardy, R., Cao, K., Sack, L., 2014. Global analysis of plasticity in turgor loss point, a key drought tolerance trait. *Ecology Letters* 17, 1580–1590. <https://doi.org/10.1111/ele.12374>

- Blackman, C.J., Brodribb, T.J., Jordan, G.J., 2010. Leaf hydraulic vulnerability is related to conduit dimensions and drought resistance across a diverse range of woody angiosperms. *New Phytologist* 188, 1113–1123. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03439.x>
- Brodribb, T.J., Holbrook, N.M., 2003. Stomatal closure during leaf dehydration, correlation with other leaf physiological traits. *Plant Physiology* 132, 2166–2173. <https://doi.org/10.1104/pp.103.023879>
- Castillo-Argaez, R., Sapes, G., Mallen, N., Lippert, A., John, G.P., Zare, A., Hammond, W.M., 2024. Spectral ecophysiology: hyperspectral pressure–volume curves to estimate leaf turgor loss. *New Phytologist* 242, 935–946. <https://doi.org/10.1111/nph.19669>
- Chadwick, R., Good, P., Martin, G., Rowell, D.P., 2015. Large rainfall changes consistently projected over substantial areas of tropical land. *Nature Climate Change* 6, 177–181. <https://doi.org/10.1038/nclimate2805>
- Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S.L., Swenson, N.G., Zanne, A.E., 2009. Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters* 12, 351–366. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>
- Choat, B., Jansen, S., Brodribb, T.J., Cochard, H., Delzon, S., Bhaskar, R., Bucci, S.J., Feild, T.S., Gleason, S.M., Hacke, U.G., Jacobsen, A.L., Lens, F., Maherali, H., Martínez-Vilalta, J., Mayr, S., Mencuccini, M., Mitchell, P.J., Nardini, A., Pittermann, J., Pratt, R.B., Sperry, J.S., Westoby, M., Wright, I.J., Zanne, A.E., 2012. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* 491, 752–755. <https://doi.org/10.1038/nature11688>
- Comita, L.S., Engelbrecht, B.M.J., 2014. Forests and Global Change: Drought as a driver of tropical tree species regeneration dynamics and distribution patterns. *Forests and Global Change* 261–308. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107323506.013>
- Cosme, L.H.M., Schietti, J., Costa, F.R.C., Oliveira, R.S., 2017. The importance of hydraulic architecture to the distribution patterns of trees in a central Amazonian forest. *New Phytologist* 215, 113–125. <https://doi.org/10.1111/nph.14508>
- Costa, J.R., Tonini, H., Silva, M.F., 2009 Aspectos silviculturais da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) em sistemas agroflorestais na Amazônia Central. *Acta Amazonica* 39, 843–850. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000400013>
- Csardi, G., Nepusz, T., 2006. The igraph software package for complex network research. *InterJournal Complex Systems*, 1695. Available at: <http://igraph.org>
- Espinoza, J.C., Jimenez, J.C., Marengo, J.A., Schongart, J., Ronchail, J., Lavado-Casimiro, W., Ribeiro, J.V.M., 2024. The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. *Scientific Reports* 14, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>
- Feldpausch, T.R., Phillips, O.L., Brien, R.J.W., Gloor, E., Lloyd, J., Lopez-Gonzalez, G., Monteagudo-Mendoza, A., Malhi, Y., Alarcón, A., Álvarez Dávila, E., Alvarez-Loayza, P., Andrade, A., Aragao, L.E.O.C., Arroyo, L., Aymard, C.G.A., Baker, T.R., Baraloto, C., Barroso, J., Bonal, D., Castro, W., Chama, V., Chave, J., Domingues, T.F.,

Fauset, S., Groot, N., Honorio Coronado, E., Laurance, S., Laurance, W.F., Lewis, S.L., Licona, J.C., Marimon, B.S., Marimon-Junior, B.H., Mendoza Bautista, C., Neill, D.A., Oliveira, E.A., Oliveira dos Santos, C., Pallqui Camacho, N.C., Pardo-Molina, G., Prieto, A., Quesada, C.A., Ramírez, F., Ramírez-Angulo, H., Réjou-Méchain, M., Rudas, A., Saiz, G., Salomão, R.P., Silva-Espejo, J.E., Silveira, M., ter Steege, H., Stropp, J., Terborgh, J., Thomas-Caesar, R., van der Heijden, G.M.F., Vásquez Martínez, R., Vilanova, E., Vos, V.A., 2016. Amazon forest response to repeated droughts. *Global Biogeochemical Cycles* 30, 964–982. <https://doi.org/10.1002/2015gb005133>

Flores, B.M., Montoya, E., Sakschewski, B., Nascimento, N., Staal, A., Betts, R.A., Levis, C., Lapola, D.M., Esquivel-Muelbert, A., Jakovac, C., Nobre, C.A., Oliveira, R.S., Borma, L.S., Nian, D., Boers, N., Hecht, S.B., ter Steege, H., Arieira, J., Lucas, I.L., Berenguer, E., Marengo, J.A., Gatti, L. V., Mattos, C.R.C., Hirota, M., 2024. Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature* 626, 555–564. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0>

Gao, J., Huang, W., Gielis, J., Shi, P., 2023. Plant morphology and function, geometric morphometrics, and modelling: decoding the mathematical secrets of plants. *Plants* 12, 3724. <https://doi.org/10.3390/plants12213724>

Gerlach, D., 1984: *Botanische Mikrotechnik: eine Einführung*. 3rd ed.. Georg Thieme, Stuttgart.

Gleason, S.M., Westoby, M., Jansen, S., Choat, B., Hacke, U.G., Pratt, R.B., Bhaskar, R., Brodribb, T.J., Bucci, S.J., Cao, K.F., Cochard, H., Delzon, S., Domec, J.C., Fan, Z.X., Feild, T.S., Jacobsen, A.L., Johnson, D.M., Lens, F., Maherali, H., Martínez-Vilalta, J., Mayr, S., Mcculloh, K.A., Mencuccini, M., Mitchell, P.J., Morris, H., Nardini, A., Pittermann, J., Plavcová, L., Schreiber, S.G., Sperry, J.S., Wright, I.J., Zanne, A.E., 2016. Weak tradeoff between xylem safety and xylem-specific hydraulic efficiency across the world's woody plant species. *New Phytologist* 209, 123–136. <https://doi.org/10.1111/nph.13646>

Guarnaschelli, A.B., Garau, A.M., Lemcoff, J.H., 2012. Water stress and afforestation: a contribution to ameliorate forest seedling performance during the establishment. *Water Stress* 2, 74-110. <https://doi.org/10.5772/32691>

Guzman, M.E., Acosta-Rangel, A., Winter, K., Meinzer, F.C., Bonal, D., Santiago, L.S., 2021. Hydraulic traits of Neotropical canopy liana and tree species across a broad range of wood density: implications for predicting drought mortality with models. *Tree Physiology* 41, 24–34. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa106>

Hacke, U.G., Sperry, J.S., 2001. Functional and ecological xylem anatomy. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics* 4, 97–115. <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00017>

Hacke, U.G., Spicer, R., Schreiber, S.G., Plavcová, L., 2017. An ecophysiological and developmental perspective on variation in vessel diameter. *Plant, Cell & Environment* 40, 831–845. <https://doi.org/10.1111/pce.12777>

He, P., Gleason, S.M., Wright, I.J., Weng, E., Liu, H., Zhu, S., Lu, M., Luo, Q., Li, R., Wu, G., Yan, E., Song, Y., Mi, X., Hao, G., Reich, P.B., Wang, Y., Ellsworth, D.S., Ye,

Q., 2020. Growing-season temperature and precipitation are independent drivers of global variation in xylem hydraulic conductivity. *Global Change Biology* 26, 1833–1841. <https://doi.org/10.1111/gcb.14929>

Hoeber, S., Leuschner, C., Köhler, L., Arias-Aguilar, D., Schuldt, B., 2014. The importance of hydraulic conductivity and wood density to growth performance in eight tree species from a tropical semi-dry climate. *Forest Ecology & Management* 330, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.039>

Hölttä, T., Cochard, H., Nikinmaa, E., Mencuccini, M., 2009. Capacitive effect of cavitation in xylem conduits: results from a dynamic model. *Plant, Cell & Environment* 32, 10–21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2008.01894.x>

Hugalde, I.P., Agüero, C.B., Barrios-Masias, F.H., Romero, N., Viet Nguyen, A., Riaz, S., Piccoli, P., McElrone, A.J., Walker, M.A., Vila, H.F., 2020. Modeling vegetative vigour in grapevine: unraveling underlying mechanisms. *Heliyon* 6, e05708. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05708>

International Tropical Timber Organization - ITTO (Organização Internacional de Madeiras Tropicais), 2020. Relatório do Mercado de Madeiras Tropicais.

James, J.J., Svejcar, T.J., Rinella, M.J., 2011. Demographic processes limiting seedling recruitment in arid grassland restoration. *Journal of Applied Ecology* 48, 961–969. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02009.x>

Janssen, T.A.J., Hölttä, T., Fleischer, K., Naudts, K., Dolman, H., 2020. Wood allocation trade-offs between fiber wall, fiber lumen, and axial parenchyma drive drought resistance in neotropical trees. *Plant, Cell & Environment* 43, 965–980. <https://doi.org/10.1111/pce.13687>

Jiménez-Muñoz, J.C., Mattar, C., Barichivich, J., Santamaría-Artigas, A., Takahashi, K., Malhi, Y., Sobrino, J.A., Schrier, G. Van Der, 2016. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015-2016. *Scientific Reports* 6, 33130. <https://doi.org/10.1038/srep33130>

Johansen, D. A., 1940: *Plant Microtechnique*. McGraw-Hill, New York.

Kozłowski, T.T., Kramer, J.P., Pallardy, G.S., 1990. *The Physiological Ecology of Woody Plants* [WWW Document]. URL <https://doi.org/10.1016/C2009-0-02706-8>

Kunert, N., Münchinger, I.K., Hajek, P., 2024. Turgor loss point explains climate-driven growth reductions in trees in Central Europe. *Plant Biology*. <https://doi.org/10.1111/plb.13687>

Lapola, D.M., Pinho, P., Barlow, J., Aragão, L.E.O.C., Berenguer, E., Carmenta, R., Liddy, H.M., Seixas, H., Silva, C.V.J., Silva-Junior, C.H.L., Alencar, A.A.C., Anderson, L.O., Armenteras, D., Brovkin, V., Calders, K., Chambers, J., Chini, L., Costa, M.H., Faria, B.L., Fearnside, P.M., Ferreira, J., Gatti, L., Gutierrez-Velez, V.H., Han, Z., Hibbard, K., Koven, C., Lawrence, P., Pongratz, J., Portela, B.T.T., Rounsevell, M., Ruane, A.C., Schaldach, R., da Silva, S.S., von Randow, C., Walker, W.S., 2023. The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science* 379, e abp8622. <https://doi.org/10.1126/science.abp8622>

- Lens, F., Sperry, J.S., Christman, M.A., Choat, B., Rabaey, D., Jansen, S., 2011. Testing hypotheses that link wood anatomy to cavitation resistance and hydraulic conductivity in the genus *Acer*. *New Phytologist* 190, 709–723. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03518.x>
- Li, S., Wang, J., Lu, S., Salmon, Y., Liu, P., Guo, J., 2023. Trade-off between hydraulic safety and efficiency in plant xylem and its influencing factors. *Forests* 14, 1817. <https://doi.org/10.3390/f14091817>
- Lima, A.F.L., Campos, M.C.C., Martins, T.S., Silva, G.A., Brito, W.B.M., dos Santos, L.A.C., de Oliveira, I.A., da Cunha, J.M., 2022. Soil chemical attributes in areas under conversion from forest to pasture in southern Brazilian Amazon. *Scientific Reports* 12, 1–21. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25406-9>
- Loepfe, L., Martinez-Vilalta, J., Piñol, J., Mencuccini, M., 2007. The relevance of xylem network structure for plant hydraulic efficiency and safety. *Journal of Theoretical Biology* 247, 788–803. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2007.03.036>
- Lorenzi, H., 2002. *Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil*. 2. ed. Instituto Plantarum, Nova Odessa, 368 p.
- Marengo, J.A., Tomasella, J., Alves, L.M., Soares, W.R., Rodriguez, D.A., 2011. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophysical Research Letters* 38. <https://doi.org/10.1029/2011gl047436>
- Martínez-Vilalta, J., Garcia-Forner, N., 2016. Water potential regulation, stomatal behaviour and hydraulic transport under drought: deconstructing the iso/anisohydric concept. *Plant, Cell & Environment* 40, 962–976. <https://doi.org/10.1111/pce.12846>
- Martínez-Vilalta, J., Poyatos, R., Aguadé, D., Retana, J., Mencuccini, M., 2014. A new look at water transport regulation in plants. *New Phytologist* 204, 105–115. <https://doi.org/10.1111/nph.12912>
- McCulloh, K.A., Meinzer, F.C., Sperry, J.S., Lachenbruch, B., Voelker, S.L., Woodruff, D.R., Domec, J.C., 2011. Comparative hydraulic architecture of tropical tree species representing a range of successional stages and wood density. *Oecologia* 167, 27–37. <https://doi.org/10.1007/s00442-011-1973-5>
- Meinzer, F.C., Johnson, D.M., Lachenbruch, B., McCulloh, K.A., Woodruff, D.R., 2009. Xylem hydraulic safety margins in woody plants: coordination of stomatal control of xylem tension with hydraulic capacitance. *Functional Ecology* 23, 922–930. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01577.x>
- Méndez-Alonzo, R., Paz, H., Zuluaga, R.C., Rosell, J.A., Olson, M.E., 2012. Coordinated evolution of leaf and stem economics in tropical dry forest trees. *Ecology* 93, 2397–2406. <https://doi.org/10.1890/11-1213.1>
- Mrad, A., Johnson, D.M., Love, D.M., Domec, J.C., 2021. The roles of conduit redundancy and connectivity in xylem hydraulic functions. *New Phytologist* 231, 996–1007. <https://doi.org/10.1111/nph.17429>
- Nardini, A., Luglio, J., 2014. Leaf hydraulic capacity and drought vulnerability: possible

trade-offs and correlations with climate across three major biomes. *Functional Ecology* 28, 810–818. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12246>

Nardini, A., Pedà, G., Rocca, N. La, 2012. Trade-offs between leaf hydraulic capacity and drought vulnerability: morpho-anatomical bases, carbon costs and ecological consequences. *New Phytologist* 196, 788–798. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04294.x>

Oksanen, J., Blanchet, F.G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., Minchin, P.R., O'Hara, R.B., Simpson, G.L., Solymos, P., Stevens, M.H.H., Szoecs, E., Wagner, H., 2024. *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.6-4. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>

Oliveira, R.S., Eller, C.B., Barros, F. de V., Hirota, M., Brum, M., Bittencourt, P., 2021. Linking plant hydraulics and the fast–slow continuum to understand resilience to drought in tropical ecosystems. *New Phytologist* 230, 904–923. <https://doi.org/10.1111/nph.17266>

Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulange, J., Burek, P., Gädeke, A., Gerten, D., Gosling, S.N., Grillakis, M., Gudmundsson, L., Hanasaki, N., Kim, H., Koutroulis, A., Liu, J., Papadimitriou, L., Schewe, J., Müller Schmied, H., Stacke, T., Telteu, C.E., Thiery, W., Veldkamp, T., Zhao, F., Wada, Y., 2021. Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change* 11, 226–233. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00972-w>

Poorter, L., McDonald, I., Alarcón, A., Fichtler, E., Licona, J.-C., Peña-Claros, M., Sterck, F., Villegas, Z., Sass-Klaassen, U., 2010. The importance of wood traits and hydraulic conductance for the performance and life history strategies of 42 rainforest tree species. *New Phytologist* 185, 481–492. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03092.x>

Poorter, L., Rozendaal, D.M.A., Bongers, F., de Almeida-Cortez, J.S., Almeyda Zambrano, A.M., Álvarez, F.S., Andrade, J.L., Villa, L.F.A., Balvanera, P., Becknell, J.M., Bentos, T.V., Bhaskar, R., Boukili, V., Brancalion, P.H.S., Broadbent, E.N., César, R.G., Chave, J., Chazdon, R.L., Colletta, G.D., Craven, D., de Jong, B.H.J., Denslow, J.S., Dent, D.H., DeWalt, S.J., García, E.D., Dupuy, J.M., Durán, S.M., Espírito Santo, M.M., Fandiño, M.C., Fernandes, G.W., Finegan, B., Moser, V.G., Hall, J.S., Hernández-Stefanoni, J.L., Jakovac, C.C., Junqueira, A.B., Kennard, D., Lebrija-Trejos, E., Letcher, S.G., Lohbeck, M., Lopez, O.R., Marín-Spiotta, E., Martínez-Ramos, M., Martins, S.V., Massoca, P.E.S., Meave, J.A., Mesquita, R., Mora, F., de Souza Moreno, V., Müller, S.C., Muñoz, R., Muscarella, R., de Oliveira Neto, S.N., Nunes, Y.R.F., Ochoa-Gaona, S., Paz, H., Peña-Claros, M., Piotta, D., Ruíz, J., Sanaphre-Villanueva, L., Sanchez-Azofeifa, A., Schwartz, N.B., Steininger, M.K., Thomas, W.W., Toledo, M., Uriarte, M., Utrera, L.P., van Breugel, M., van der Sande, M.T., van der Wal, H., Veloso, M.D.M., Vester, H.F.M., Vieira, I.C.G., Villa, P.M., Williamson, G.B., Wright, S.J., Zanini, K.J., Zimmerman, J.K., Westoby, M., 2019. Wet and dry tropical forests show opposite successional pathways in wood density but converge over time. *Nature Ecology & Evolution* 3, 928–934. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0882-6>

Quintana-Pulido, C., Villalobos-González, L., Muñoz, M., Franck, N., Pastenes, C., 2018. Xylem structure and function in three grapevine varieties. *Chilean Journal Agricultural Research* 78, 419–428. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392018000300419>

R Core Team, 2024. A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

Rao, A.S., Chhawri, R., Chauhan, A., Yadav, S.S., Meena, K.C., Bansal, P., 2024. Plant functional traits: a key framework for understanding and managing ecosystem responses to global environmental challenges. In: Kumar, N., Singh, H. (Eds.), *Plant Functional Traits for Improving Productivity*, pp. 287–299. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-1510-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-981-97-1510-7_15)

Reich, P.B., 2014. The world-wide ‘fast–slow’ plant economics spectrum: a traits manifesto. *Journal of Ecology* 102, 275–301. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12211>

Saito, T., Terashima, I., 2004. Reversible decreases in the bulk elastic modulus of mature leaves of deciduous *Quercus* species subjected to two drought treatments. *Plant, Cell & Environment* 27, 863–875. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2004.01192.x>

Savi, T., Love, V.L., Dal Borgo, A., Martellos, S., Nardini, A., 2017. Morpho-anatomical and physiological traits in saplings of drought-tolerant Mediterranean woody species. *Trees – Structure and Function* 31, 1137–1148. <https://doi.org/10.1007/S00468-017-1533-7>

Scholz, A., Klepsch, M., Karimi, Z., Jansen, S., 2013. How to quantify conduits in wood? *Frontiers in Plant Science* 4, 56. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00056>

Schuldt, B., Leuschner, C., Brock, N., 2013. Changes in wood density, wood anatomy and hydraulic properties of the xylem along the root-to-shoot flow path in tropical rainforest trees. *Tree Physiology* 33, 161–174.

Silva, B.M.S., Carvalho, N.M., 2008. Efeitos do estresse hídrico sobre o desempenho germinativo da semente de faveira (*Clitoria fairchildiana* R.A. Howard – Fabaceae) de diferentes tamanhos. *Revista Brasileira de Sementes* 30, 55–65. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222008000100008>

Souza, B.C., Oliveira, R.S., De Araújo, F.S., De Lima, A.L.A., Rodal, M.J.N., 2015. Divergências funcionais e estratégias de resistência à seca entre espécies decíduas e sempre verdes tropicais. *Rodriguesia* 66, 21–32. <https://doi.org/10.1590/2175-7860201566102>

Sperry, J.S., Stiller, V., Hacke, U.G., 2003. Xylem hydraulics and the soil–plant–atmosphere continuum: opportunities and unresolved issues. *Agronomy Journal* 95, 1362–1370. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.1362>

Sperry, J.S., Venturas, M.D., Anderegg, W.R.L., Mencuccini, M., Mackay, D.S., Wang, Y., Love, D.M., 2017. Predicting stomatal responses to the environment from the optimization of photosynthetic gain and hydraulic cost. *Plant, Cell & Environment* 40, 816–830. <https://doi.org/10.1111/pce.12852>

Su, R., Liu, H., Wang, C., Zhang, H., Cui, J., 2022. Leaf turgor loss point is one of the best predictors of drought-induced tree mortality in tropical forest. *Frontiers Ecology and Evolution* 10, 974004. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.974004>

Swaine, M.D., Whitmore, T.C., 1988. On the definition of ecological species groups in

tropical rain forests. *Vegetatio* 75, 81–86. <https://doi.org/10.1007/bf00044629>

Tavares, J.V., Oliveira, R.S., Mencuccini, M., Signori-Müller, C., Pereira, L., Diniz, F.C., Gilpin, M., Marca Zevallos, M.J., Salas Yupayccana, C.A., Acosta, M., Pérez Mullisaca, F.M., Barros, F. de V., Bittencourt, P., Jancoski, H., Scalón, M.C., Marimon, B.S., Oliveras Menor, I., Marimon, B.H., Fancourt, M., Chambers-Ostler, A., Esquivel-Muelbert, A., Rowland, L., Meir, P., Lola da Costa, A.C., Nina, A., Sanchez, J.M.B., Tintaya, J.S., Chino, R.S.C., Baca, J., Fernandes, L., Cumapa, E.R.M., Santos, J.A.R., Teixeira, R., Tello, L., Ugarteche, M.T.M., Cuellar, G.A., Martinez, F., Araujo-Murakami, A., Almeida, E., da Cruz, W.J.A., del Aguila Pasquel, J., Aragão, L., Baker, T.R., de Camargo, P.B., Brien, R., Castro, W., Ribeiro, S.C., Coelho de Souza, F., Cosío, E.G., Davila Cardozo, N., da Costa Silva, R., Disney, M., Espejo, J.S., Feldpausch, T.R., Ferreira, L., Giacomini, L., Higuchi, N., Hirota, M., Honorio, E., Huaraca Huasco, W., Lewis, S., Flores Llampaço, G., Malhi, Y., Monteagudo Mendoza, A., Morandi, P., Chama Moscoso, V., Muscarella, R., Penha, D., Rocha, M.C., Rodrigues, G., Ruschel, A.R., Salinas, N., Schlickmann, M., Silveira, M., Talbot, J., Vásquez, R., Vedovato, L., Vieira, S.A., Phillips, O.L., Gloor, E., Galbraith, D.R., 2023. Basin-wide variation in tree hydraulic safety margins predicts the carbon balance of Amazon forests. *Nature* 617, 111–117. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05971-3>

Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G., 2017. Manual de métodos de análise de solo. 3rd edition, p574. Ed. rev. e ampl. Embrapa Solos, Brasília, DF.

Tng, D.Y.P., Apgaua, D.M.G., Ishida, Y.F., Mencuccini, M., Lloyd, J., Laurance, W.F., Laurance, S.G.W., 2018. Rainforest trees respond to drought by modifying their hydraulic architecture. *Ecology and Evolution* 8, 12479–12491. <https://doi.org/10.1002/ece3.4601>

Tyree, M.T., Alexander, J.D., 1993. Hydraulic conductivity of branch junctions in three temperate tree species. *Trees* 7, 156–159. <https://doi.org/10.1007/bf00199616>

Tyree, M.T., Ewers, F.W., 1991. The hydraulic architecture of trees and other woody plants. *New Phytologist* 119, 345–360. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1991.tb00035.x>

Tyree, M.T., Zimmermann, M.H., 2002. Hydraulic architecture of whole plants and plant performance. In: Tyree, M.T., Zimmermann, M.H. (Eds.), *Xylem Structure and the Ascent of Sap*, pp. 175–214. Springer, Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04931-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04931-0_6)

Violle, C., Navas, M.L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., Garnier, E., 2007. Let the concept of trait be functional! *Oikos* 116, 882–892. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x>

Wei, T., Simko, V., 2021. corrplot: Visualization of a Correlation Matrix. R package version 0.92. <https://github.com/taiyun/corrplot>

Wolfe, B., Sperry, J., Kursar, T.A., 2016. Does leaf shedding protect stems from cavitation during seasonal droughts? A test of the hydraulic fuse hypothesis. *New Phytologist* 212, 1007–1018. <https://doi.org/10.1111/nph.14087>

Yao, Y., Ciais, P., Viovy, N., Joetzer, E., Chave, J., 2023. How drought events during

the last century have impacted biomass carbon in Amazonian rainforests. *Global Change Biology* 29, 747–762. <https://doi.org/10.1111/gcb.16504>

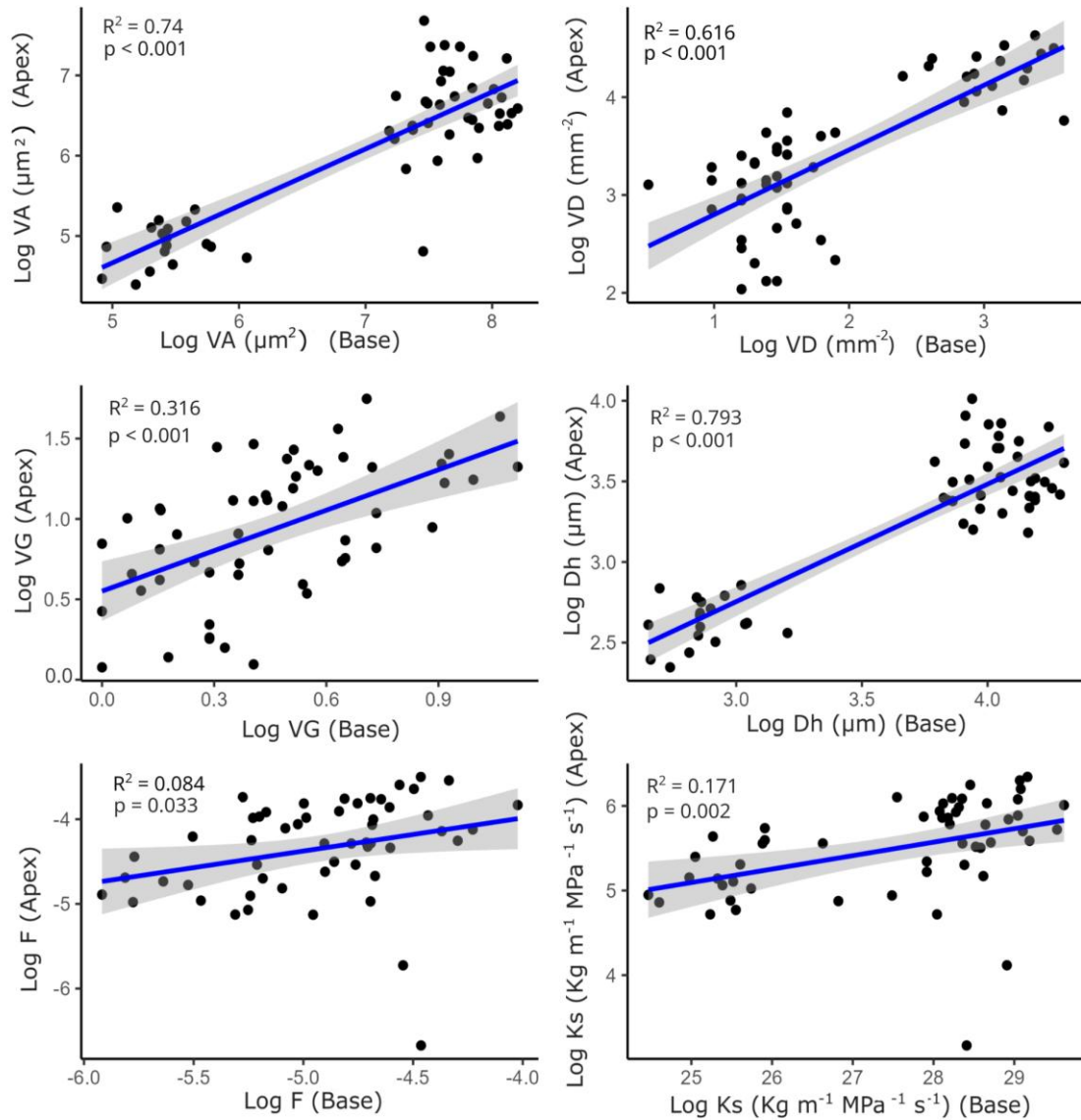
Yared, J. A. G.; Kanashiro, M.; Viana, L. M.; Castro, T. C. De; Pantoja, J. R. De S., 1993 Comportamento silvicultural de castanheira (*Bertholletia excelsa* H. & K.), em diversos locais na Amazônia. In: Congresso Florestal Panamericano, Curitiba-PR. Anais Sociedade Brasileira de Silvicultura/Sociedade Brasileira de Engenheiros Florestais, v.2 p.416-418.

Zanne, A.E., Westoby, M., Falster, D.S., Ackerly, D.D., Loarie, S.R., Arnold, S.E.J., Coomes, D.A., 2010. Angiosperm wood structure: global patterns in vessel anatomy and their relation to wood density and potential conductivity. *American Journal of Botany* 97, 207–215. <https://doi.org/10.3732/ajb.0900178>

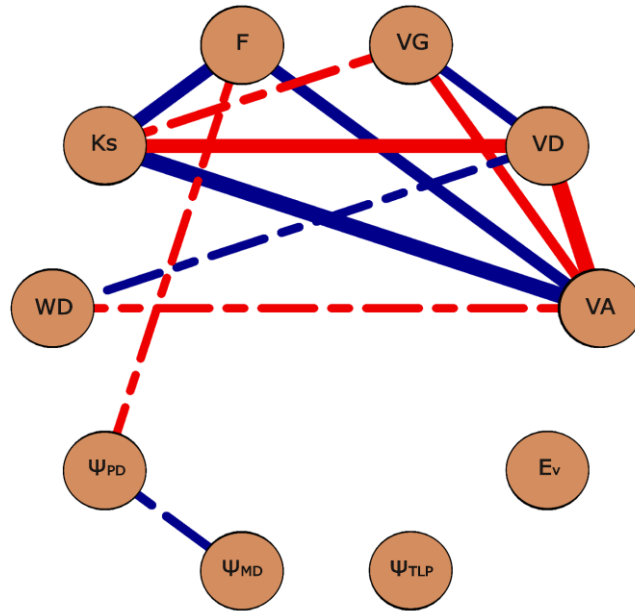
Zhang, X., Ramakanth, K.K., Long, Y., 2024. The biomechanics of turgor pressure. *Current Biology* 34, R986–R991. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.07.013>

Zhao, X., 2016. Spatial variation of vessel grouping in the xylem of *Betula platyphylla* Roth. *Journal of Plant Research* 129, 29–37. <https://doi.org/10.1007/s10265-015-0768-x>

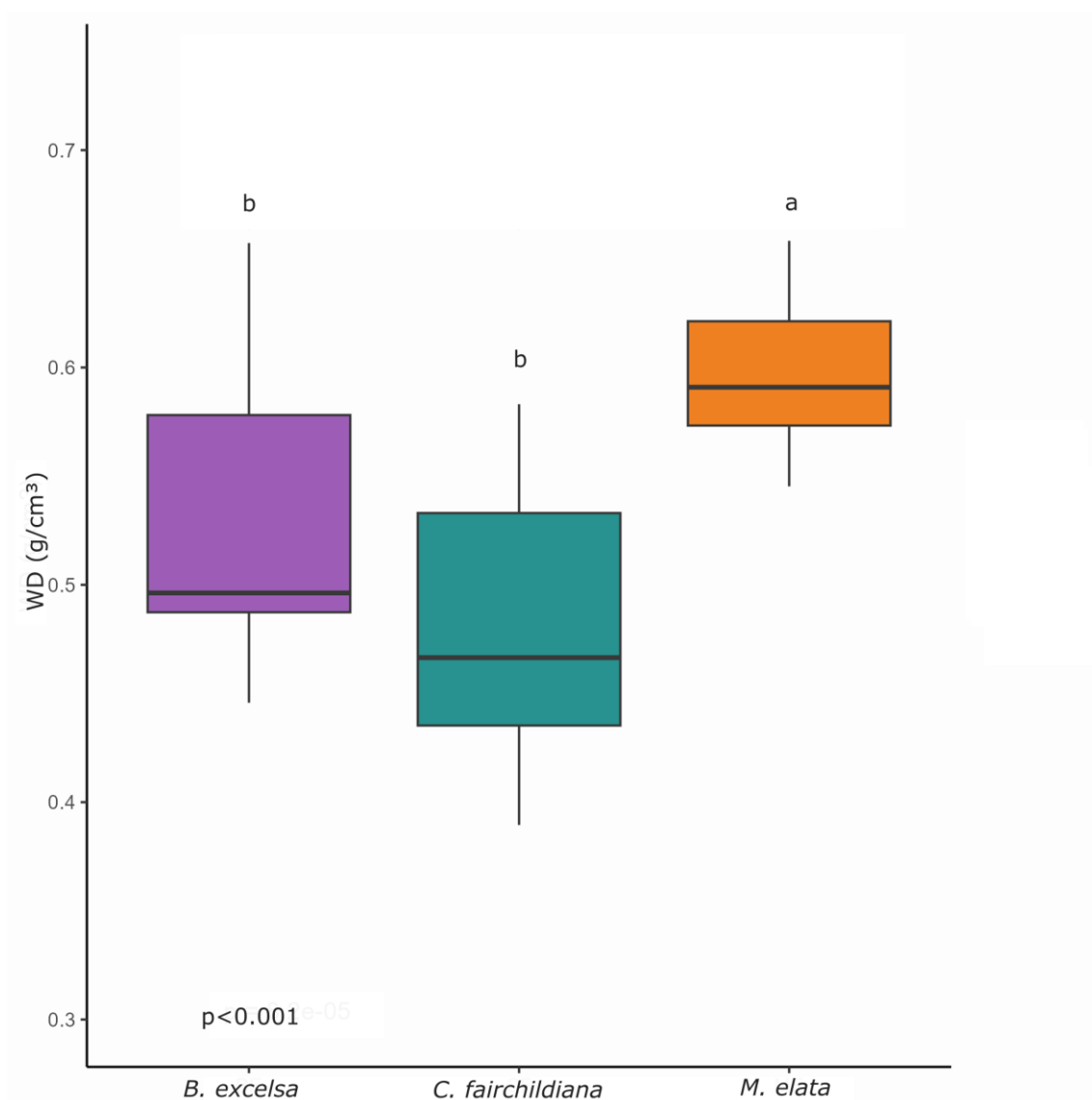
## 8. MATERIAL SUPLEMENTAR



**Figure S1.** Coordenação entre os atributos funcionais das regiões da base e do ápice do caule das espécies investigadas. Os valores dos atributos foram transformados em logaritmo. Os atributos anatômicos analisados incluem VA (área dos vasos), VG (índice de agrupamento dos vasos), Ks (condutividade teórica específica do xilema), F (fração do lúmen dos vasos), Dh (diâmetro hidráulico dos vasos) e VD (densidade dos vasos).



**Figure S2.** Rede de correlação de Spearman entre atributos anatômicos e fisiológicos das espécies estudadas, em que correlações positivas são indicadas em azul e negativas em vermelho. A intensidade da correlação é representada pela espessura das linhas, sendo as linhas tracejadas indicativas de relações fracas ( $r < 0,05$ ). Apenas correlações com valor de p significativo foram exibidas.  $\Psi_{TLP}$  (ponto de perda de turgor),  $\Psi_{PD}$  (potencial hídrico pré-dawn),  $\Psi_{MD}$  (potencial hídrico ao meio-dia),  $E_v$  (módulo de elasticidade), WD (densidade da madeira), VA (área dos vasos), VG (índice de agrupamento dos vasos), VD (densidade dos vasos), Ks (condutividade teórica específica do xilema) e F (fração do lúmen dos vasos).



**Figura S3.** Densidade da madeira (WD) de *Bertholletia excelsa* (BE), *Clitoria fairchildiana* (CF) e *Manilkara elata* (ME). Diferenças significativas entre os tratamentos são indicadas por letras minúsculas. Os dados foram analisados pelo teste de Kruskal–Wallis, seguido de testes de Wilcoxon post-hoc com valores de p ajustados por Bonferroni ( $\alpha = 0,05$ ).

**Table S1.** Propriedades físicas e químicas do solo utilizado no experimento.

| Parameter                              | Unit                  | Value      |
|----------------------------------------|-----------------------|------------|
| Mehlich-1 Phosphorus                   | mg/dm <sup>3</sup>    | 2          |
| Remaining Phosphorus                   | mg/kg                 | 24         |
| Potassium                              | mg/dm <sup>3</sup>    | 18         |
| Sulfur                                 | mg/dm <sup>3</sup>    | 4          |
| Calcium                                | cmolc/dm <sup>3</sup> | 0.3        |
| Magnesium                              | cmolc/dm <sup>3</sup> | 0.1        |
| Exchangeable Aluminum                  | cmolc/dm <sup>3</sup> | 0.4        |
| Potential Acidity (H+Al)               | cmolc/dm <sup>3</sup> | 4.2        |
| Extractable Hydrogen (H <sup>+</sup> ) | cmolc/dm <sup>3</sup> | 3.8        |
| pH (H <sub>2</sub> O)                  | -                     | 5.10       |
| pH SMP                                 | -                     | 6.00       |
| Organic Carbon                         | g/kg                  | 54.00      |
| Iron                                   | mg/dm <sup>3</sup>    | 108.0      |
| Zinc                                   | mg/dm <sup>3</sup>    | 0.6        |
| Copper                                 | mg/dm <sup>3</sup>    | 0.1        |
| Manganese                              | mg/dm <sup>3</sup>    | 1.1        |
| Boron                                  | mg/dm <sup>3</sup>    | 0.14       |
| Sodium                                 | mg/dm <sup>3</sup>    | 8.0        |
| Total Nitrogen                         | g/kg                  | 0.97       |
| Coarse Sand                            | g/kg                  | 574        |
| Fine Sand                              | g/kg                  | 274        |
| Total Sand                             | g/kg                  | 848        |
| Silt                                   | g/kg                  | 92         |
| Clay                                   | g/kg                  | 60         |
| Textural Classification                | -                     | Sandy Loam |
| Silt/Clay Ratio                        | -                     | 1.53       |
| C/N Ratio                              | -                     | 55.67      |
| Ca/Mg Ratio                            | -                     | 4.67       |
| Ca/K Ratio                             | -                     | 6.07       |
| Mg/K Ratio                             | -                     | 1.30       |
| Ca Saturation in CEC (T)               | %                     | 6.05       |
| Mg Saturation in CEC (T)               | %                     | 1.30       |
| K Saturation in CEC (T)                | %                     | 1.00       |
| H <sup>+</sup> Saturation in CEC (T)   | %                     | 82.07      |
| Sodium Saturation Index (INa)          | %                     | 0.75       |
| Sum of Bases (SB)                      | cmolc/dm <sup>3</sup> | 0.39       |
| Effective CEC (t)                      | cmolc/dm <sup>3</sup> | 0.79       |
| CEC at pH 7.0 (T)                      | cmolc/dm <sup>3</sup> | 4.63       |
| Aluminum Saturation (m)                | %                     | 50.63      |
| Base Saturation (V)                    | %                     | 8.42       |
| Moisture (60–65°C)                     | %                     | 1.00       |

SMP: pH measured in Shoemaker-McLean-Pratt buffer solution, used to estimate lime requirement.

**Tabela S2.** Diâmetro final do caule (mm) e número de folhas por muda para cada indivíduo de *Bertholletia excelsa*, *Clitoria fairchildiana* e *Manilkara elata* ao final do experimento. A tabela apresenta os valores individuais e as médias por espécie.

| <i>Bertholletia<br/>excelsa</i> | No. of<br>Leaves | Stem<br>Diameter<br>(mm) | <i>Clitoria<br/>fairchildiana</i> | No. of<br>Leaves | Stem<br>Diameter<br>(mm) | <i>Manilkara<br/>elata</i> | No. of<br>Leaves | Stem<br>Diameter<br>(mm) |
|---------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------|
| B1                              | 9                | 14.55                    | C1                                | 8                | 8.96                     | M1                         | 6                | 6.61                     |
| B2                              | 24               | 11.1                     | C2                                | 7                | 10.45                    | M2                         | 3                | 8.17                     |
| B3                              | 18               | 14.29                    | C3                                | 9                | 10.46                    | M3                         | 6                | 7.61                     |
| B4                              | 33               | 11.65                    | C4                                | 8                | 11.74                    | M4                         | 6                | 8.76                     |
| B5                              | 16               | 13.97                    | C5                                | 5                | 13.11                    | M5                         | 9                | 8                        |
| B6                              | 11               | 12.46                    | C6                                | 10               | 12.3                     | M6                         | 12               | 10.42                    |
| B7                              | 25               | 12.34                    | C7                                | 34               | 14.25                    | M7                         | 7                | 10.05                    |
| B8                              | 32               | 15.31                    | C8                                | 17               | 8.74                     | M8                         | 4                | 6.13                     |
| B9                              | 40               | 15.2                     | C9                                | 23               | 16.07                    | M9                         | 10               | 7.51                     |
| B10                             | 26               | 14.2                     | C10                               | 30               | 11.87                    | M10                        | 5                | 9.03                     |
| B11                             | 44               | 15.91                    | C11                               | 14               | 14.65                    | M11                        | 14               | 8.9                      |
| B12                             | 22               | 10.93                    | C12                               | 11               | 13.74                    | M12                        | 5                | 8.5                      |
| B13                             | 33               | 17.97                    | C13                               | 55               | 15.83                    | M13                        | 14               | 10.75                    |
| B14                             | 57               | 15.17                    | C14                               | 58               | 16.75                    | M14                        | 5                | 8.6                      |
| B15                             | 26               | 15.9                     | C15                               | 45               | 14.46                    | M15                        | 6                | 7.55                     |
| B16                             | 34               | 14.7                     | C16                               | 29               | 10.75                    | M16                        | 12               | 9.41                     |
| B17                             | 36               | 12.97                    | C17                               | 27               | 13.81                    | M17                        | 5                | 8.2                      |
| B18                             | 56               | 16.19                    | C18                               | 65               | 18.94                    | M18                        | 4                | 8.2                      |
| <b>Mean</b>                     | <b>29</b>        | <b>14.16</b>             | <b>Mean</b>                       | <b>25</b>        | <b>13.43</b>             | <b>Mean</b>                | <b>7</b>         | <b>8.47</b>              |

**Tabela S3.** Descritores das redes de atributos para todas as espécies. D e Dw são indicadores de centralidade da rede: o grau (D) é definido como o número de conexões (correlações) que um nó possui; já o grau ponderado (Dw) é a soma de todos os coeficientes de correlação significativos de um nó.

| <b>Traits</b> | <b>Dw</b> | <b>D</b> | <b>Traits</b>                  | <b>Dw</b> | <b>D</b> |
|---------------|-----------|----------|--------------------------------|-----------|----------|
| <b>VA</b>     | 1.550     | 2        | <b>WD</b>                      | 0.00      | 0        |
| <b>VD</b>     | 2.410     | 3        | <b><math>\Psi_{PD}</math></b>  | 0.546     | 1        |
| <b>VG</b>     | 2.103     | 3        | <b><math>\Psi_{MD}</math></b>  | 0.546     | 1        |
| <b>F</b>      | 0.00      | 0        | <b><math>\Psi_{TLP}</math></b> | 0.00      | 0        |
| <b>KS</b>     | 1.311     | 2        | <b><math>E_v</math></b>        | 0.00      | 0        |