



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

Tese de Doutorado

**VARIAÇÕES E IMPACTOS DA CAPACITÂNCIA NA
FLORESTA AMAZÔNICA**

GUSTAVO CARVALHO SPANNER

Manaus - Amazonas

2023

GUSTAVO CARVALHO SPANNER

**VARIAÇÕES E IMPACTOS DA CAPACITÂNCIA NA FLORESTA
AMAZÔNICA**

Tese apresentada ao Instituto Nacional de
Pesquisas da Amazônia como parte dos
requisitos para obtenção do título de Doutor
em Ciências de Florestas Tropicais

Orientador: Dr. Niro Higuchi

Co-orientador: Dr. Bruno O. Gimenez

Manaus, Amazonas

Outubro, 2023



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

ATA DE DEFESA PÚBLICA DE TESE DE DOUTORADO

Ata da Defesa REMOTA de **GUSTAVO CARVALHO SPANNER**, ocorrida no dia 31 de outubro de 2023, via plataforma de videoconferência Zoom.

Aos 31 dias de outubro de 2023, às 14h00 (horário de Manaus/AM), realizou-se a Defesa Pública de tese de **GUSTAVO CARVALHO SPANNER**, aluno do Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Ciências de Florestas Tropicais, intitulada "Variação e impacto da capacitância nas trocas gasosas da floresta amazônica", sob a orientação do Dr. Niro Higuchi (INPA), e, coorientação do Dr. Bruno Oliva Gimenez (INPA), em conformidade com o Art. 52 do Regimento Geral da Pós-Graduação do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (MCTI/INPA) e Art. 67 do Regimento Interno do Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais, como parte das atividades para conclusão e obtenção do Título de Doutor(a) em Ciências de Florestas Tropicais. A **Banca Examinadora** foi constituída pelos seguintes membros: Adriano José Nogueira Lima (INPA), Cynthia Wright (US Forest Service), Clarissa Gouveia Fontes (UCLA), Jeffrey Quintin Chambers (LBL), Robinson Isaac Negrón Juárez (USP) e tendo como suplentes os seguintes membros: Cacilda Adélia Sampaio de Souza (INPA), Kolby Jeremiah Jardine (LBL), Marciel José Ferreira (UFAM), João Victor Figueiredo Cardoso Rodrigues (UFAM). O Presidente da Banca Examinadora deu início à seção e informou os procedimentos do exame. O aluno fez uma exposição do seu estudo e ao término foi arguido oralmente pelos membros da Comissão. Após as arguições os membros da banca se reuniram para avaliação e chegaram ao seguinte parecer:

Nome	Parecer	Assinaturas
Adriano José Nogueira Lima	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovou () Reprovou	
Cacilda Adélia Sampaio de Souza	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovou () Reprovou	
Kolby Jeremiah Jardine	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovou () Reprovou	
Jeffrey Quintin Chambers	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovou () Reprovou	
Robinson Isaac Negrón Juárez	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovou () Reprovou	
Menção:	<input checked="" type="checkbox"/> "Com Distingção" () "Com Louvor" () "Com Distingção e Louvor"	

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

Niro Higuchi
Presidente da Banca / Orientador

Adriano José Nogueira Lima
Coordenador do PPG-CFT
PO. N° 163/2021

Catálogo na Publicação (CIP-Brasil)



S735v Spanner, Gustavo
Variações e impactos da capacitância hidráulica na floresta amazônica /
Gustavo Carvalho Spanner; orientador Niro Higuchi; coorientador Bruno
Oliva Gimenez. - Manaus: [s.l.], 2023.

2,88 MB
39p. : il. color.

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

1. Ecohidrologia. 2. Uso de água. 3. Água armazenada e capacitância. I.
Higuchi, Niro. II. Gimenez, Bruno Oliva. III. Título

CDD 551.48 811 3

Dedico a minha mãe, meu maior motivo da caminhada diária.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. a) Padrões diurnos do fluxo de seiva nas posições da base e do topo do tronco de *Andira parviflora* para um dia típico da estação seca. (b) Série temporal da diferença entre o fluxo de seiva do topo em relação ao fluxo de seiva da base usando a mesma árvore de (a).

Figura 2. Uso diário de água armazenada em função de a) DBH (Diâmetro à Altura do Peito) e b) área de xilema ativo para 19 árvores na Amazônia Central.

Figura 3. Uso de água em função do uso de água armazenada para 19 árvores na Amazônia Central. Os pontos são usados para representar o consumo de água por dia.

Figura 4. Relações entre a densidade da madeira e variáveis ligadas ao armazenamento de água e ao fluxo de seiva, bem como ao investimento da planta em tecido condutor em relação à sua área de secção transversal. a) Quantidade total de água liberada da madeira versus a densidade da madeira; b) teor saturado de água da madeira versus a densidade da madeira; c) razão entre a área do xilema ativo e área da secção transversal do caule versus a densidade da madeira e d) densidade máxima do fluxo de seiva versus a razão entre a área do xilema ativo e área da secção transversal.

Figura 5) a) Quantidade total de água liberada da madeira versus a duração em tempo das taxas máximas do fluxo de seiva ao longo do dia b) tempo de atraso entre o fluxo de seiva da base e do topo versus a duração das taxas máximas do fluxo de seiva.

Figura 6) Capacitância hidráulica em relação a a) Ψ_{\min} , b) $\Psi_{\text{predawn-midday}}$, c) condutância estomática (g_s) e d) máxima fotossíntese diária (A).

Figura 7) Capacitância relativa da folha em relação ao a) Ψ_{\min} , b) $\Psi_{\text{predawn-midday}}$, c) condutância estomática (g_s) e d) máxima fotossíntese diária (A).

Figura 8. Módulo de elasticidade em relação a a) capacitância relativa da folha, b) condutância estomática (gs) e c) máxima fotossíntese diária (A).

Figura 9) Capacitância relativa da folha em relação a a) máxima transpiração foliar, b) condutância hidráulica foliar, c) densidade máxima do fluxo de seiva e d) condutância hidráulica de toda a árvore.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Variável	Sigla
Transpiração	E_t
Capacitância hidráulica	C
Densidade da madeira	WD
Teor saturado de água da madeira	WSWC
Quantidade total de água liberada da madeira	CWR
Densidade do fluxo de seiva	F_d
Uso diário de água	Q
Potencial hídrico foliar	(Ψ_{leaf})
Fotossíntese	A
Condutância estomática	g_s
Condutância hidráulica por unidade de área do xilema ativo	K_{sa}
Condutância hidráulica da folha	K_{leaf}
Capacitância relative da folha	C_{leaf}
Ponto de perda de turgor	TLP
Módulo de elasticidade da folha	ϵ

Esta tese foi submetida ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia no formato de artigo como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências de Florestas Tropicais, área de concentração em Manejo Florestal. Pretende-se submeter este manuscrito na revista científica *New Phytologist*.

VARIAÇÕES E IMPACTOS DA CAPACITÂNCIA NA FLORESTA AMAZÔNICA

RESUMO

A água armazenada, definida como a quantidade de água disponível em um tecido, órgão ou em toda a planta, fornece contribuições significativas para a transpiração e, portanto, influencia diretamente as trocas gasosas em toda a árvore. O armazenamento de água é uma função do tamanho do reservatório (por exemplo, volume do xilema ativo ou das folhas) e da capacitância, que é a quantidade de água liberada por unidade de mudança do potencial hídrico. Embora o armazenamento de água desempenhe um papel crítico na proteção dos fluxos de água das plantas durante períodos de menor disponibilidade de água no meio, há pouca informação sobre o seu papel na floresta amazônica.

Nós investigamos a influência da água armazenada e da capacitância hidráulica da madeira, das folhas e em toda a árvore nas trocas gasosas em uma floresta madura na Amazônia Central.

Árvores com maior área de xilema ativo apresentaram maior quantidade de uso da água armazenada e maior transpiração diária. A capacitância hidráulica e a capacidade de armazenamento da madeira foram intimamente associadas à densidade da madeira, sugerindo potenciais implicações na história de vida desses indivíduos. A capacitância foliar foi coordenada com a condutividade hidráulica, refletindo para espécies com alta capacitância e condutividade hidráulica maiores potenciais hídricos e maiores taxas de trocas gasosas. Maiores tempos de atrasos entre o fluxo de seiva base e do topo corresponderam a períodos mais longos onde o fluxo máximo de seiva foi mantido.

Concluimos que a capacitância hidráulica desempenha um grande papel nas trocas gasosas e tem o potencial de impactar a história de vida das árvores na Amazônia Central, caracterizando-a como uma estratégia hidráulica usadas pelas árvores para evitar a seca ao

acessar reservas de água para amortecer o estresse hídrico e impactar positivamente a economia de carbono e água desses indivíduos e florestas.

INTRODUÇÃO

As florestas tropicais são drivers importantes dos ciclos globais do carbono e da água (Pan et al. 2011; Schlesinger e Jasechko. 2014). Na escala regional, a evapotranspiração florestal é responsável por aproximadamente 50% da precipitação local na região amazônica (Salati et al. 1987; Jaschenko et al. 2013; Kunert et al. 2017). O papel da floresta amazônica está sendo afetado pela mudança do clima e seus efeitos, em particular o aumento da severidade e frequência das secas e o aumento da temperatura (IPCC, 2014), levando ao aumento da mortalidade das árvores (Aleixo et al. 2019; Esteban et al. 2021), diminuição do armazenamento de carbono (Yang et al. 2018) e potenciais reduções da transpiração que alimentam a precipitação local (Brienen et al. 2015; Doughty et al. 2015; Ellison et al. 2017). Os mecanismos subjacentes a estas mudanças funcionais nas florestas são pouco compreendidos devido à informação limitada sobre a regulação do balanço hídrico por espécies (Barros et al. 2019). Na floresta amazônica, o número de espécies de árvores pode chegar a 11.675 (ter Steege et al. 2016). Esta lacuna de conhecimento impede previsões de modelos sobre a estabilidade e função futura das florestas tropicais (Davies et al. 2021). Uma estratégia hidráulica das árvores para regular o balanço hídrico sob condições estressantes é contar com fontes de água armazenada nas folhas e nos tecidos da madeira (Scholz et al. 2007; Carrasco et al. 2015; Bucci et al. 2016).

A água armazenada, definida como a quantidade de água disponível em um tecido ou em toda a planta (Scholz et al. 2011; Kocher et al. 2014), pode ser uma fonte crítica de água para a transpiração (E_t) (Waring e Whitehead, 1979; Cermák et al. 2007; Scholz et al. 2007). Reduções comumente observadas na condutância estomática ao meio-dia podem estar associadas ao esgotamento das reservas internas de água (Andrade et al. 1998; Meinzer et

al. 2008). Água armazenada e a capacitância hidráulica são medidas intimamente relacionadas (Phillips et al. 2008). Árvores com maior capacitância hidráulica (C ; maior quantidade de água armazenada liberada por unidade de mudança de potencial hídrico) podem sustentar taxas de transpiração mais altas, permitindo também maior potencial hídrico foliar, condutância hidráulica foliar e trocas gasosas (Goldstein et al. 1998; Scholz et al. 2007; Meinzer et al. 2008). Essa água liberada afeta transitoriamente a transpiração (Andrade et al. 1998; Goldstein et al. 1998), amortecendo o sistema hidráulico da árvore durante momentos de alta tensão (Meinzer et al. 2009) e tem se mostrado um importante preditor da vulnerabilidade hidráulica a embolia (Meinzer et al. 2008; McCulloh et al. 2014). Compreender a variação na água armazenada e seus impactos subsequentes nas trocas gasosas das árvores pode ajudar a melhorar as previsões dos modelos (Xie et al. 2023).

Embora a água armazenada desempenha um papel importante no desenvolvimento das plantas (Carrasco et al. 2015) e provavelmente sua importância aumente no futuro sob a mudança do clima (Kocher et al. 2013), não há informações suficientes disponíveis para definir seu papel na floresta amazônica. As florestas na Amazônia Central, por exemplo, podem manter E_t significativa durante períodos de seca (Malhi et al. 2004; Brum et al. 2018; Spanner et al. 2022), embora secas particularmente severas podem levar a declínios em E_t (Meng et al. 2022). A manutenção de E_t durante os períodos de seca na Amazônia tem sido explicada pelo acesso das raízes às camadas profundas do solo e pela redistribuição hidráulica (Rocha et al. 2004; Oliveira et al. 2005; Spanner et al. 2022). A E_t também pode ser mantida, embora em nível reduzido, pela regulação estomática ou pela perda de folhas. Embora ainda não tenha sido examinada, a água armazenada também pode amortecer as reduções de E_t em condições de seca. A água armazenada pode ser uma estratégia hidráulica particularmente importante em árvores tropicais que vivem em ambientes úmidos com déficits hídricos moderados (Christoffersen et al. 2016; Santiago et al. 2018; Oliveira et al.

2021). Além disso, quando a precipitação diminui, há um aumento exponencial na resistência ao movimento da água do solo para as folhas devido ao elevado teor de argila nos solos tropicais (Fischer et al. 2008). Ter fontes de água armazenadas mais próximas dos estômatos pode amortecer as flutuações na E_t e, conseqüentemente, ter um impacto positivo nas margens de segurança hidráulica (Bryant et al. 2020). Portanto, o uso de água armazenada pode ser um mecanismo adicional que permite manter as trocas gasosas durante a seca.

Nós investigamos a variação interespecífica no uso de água armazenada e a capacitância hidráulica do caule e da folha e suas relações com as trocas gasosas foliares em árvores na Amazônia Central. Cinco hipóteses orientaram nossa investigação. Primeiro, levantamos a hipótese de que a água armazenada aumenta com o tamanho da árvore. Em segundo lugar, levantamos a hipótese de que a água armazenada está intimamente ligada às estratégias de história de vida da planta, ou seja, o continuum viver-rápido morrer-jovem, que se correlaciona fortemente com a densidade da madeira. Terceiro, levantamos a hipótese de que a água armazenada influencia o tempo e a magnitude da transpiração. Quarto, levantamos a hipótese de que a água armazenada beneficia as trocas gasosas ao nível da folha e ambas são afetadas pela elasticidade dos tecidos foliares. Quinto, levantamos a hipótese de que a água armazenada deveria ser coordenada com a condutância hidráulica da planta, onde esta coordenação atua para mitigar quedas no potencial hídrico dos tecidos e aumentos associados a embolia. Juntos, os testes dessas hipóteses deverão fornecer maior conhecimento sobre a regulação da dinâmica da água e do carbono nas florestas da Amazônia Central.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado na Estação Experimental de Silvicultura Tropical (E.E.S.T) pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), também conhecida como ZF-2. A área está localizada cerca de 80 km ao norte da cidade de Manaus, na Amazônia Central, Brasil. O clima característico da região de interesse segundo a classificação de Koppen é do tipo Af sem estação seca definida (Alvarez et al. 2014). Apesar disso, alguns autores definem a estação seca como meses com precipitação acumulada inferior a 100 mm (Tavares et al. 2023), assumindo um valor médio diário de evapotranspiração de 3,3 mm (Aragão et al. 2007), o que geralmente coincide com os meses de julho, agosto, setembro e outubro na Amazônia Central. A precipitação média anual para a região é de 2.400 mm (Araújo et al. 2002; Alvarez et al. 2004). A temperatura média anual na região de Manaus é de 26,7°C, variando de 25,9°C a 27,7°C (Alvarez et al. 2014). A floresta é de terra firme, localizada no platô, sob latossolos amarelos distróficos, com altos teores de argilas e óxidos de alumínio (Chauvel et al. 1987).

Seleção das árvores

O presente estudo está localizado em uma área de floresta tropical madura de terras firme que recebeu exploração madeireira experimental de ¼ de sua área basal em 1987 (Higuchi et al. 1985). Esta área faz parte de um projeto de manejo florestal que monitora o crescimento e a mortalidade das árvores com o objetivo de compreender o efeito que diferentes intensidades de exploração podem ter no desenvolvimento futuro da floresta (para o desenho específico e os resultados do projeto, ver Higuchi et al. 1985; Amaral et al. 2019; Guai et al. 2019). Selecionamos 19 árvores para nosso estudo sobre armazenamento de água e capacitância. Selecionamos indivíduos que abrangiam uma ampla faixa de densidade de madeira (Chave et al. 2009) e que estavam presentes no estrato do dossel da floresta por representarem o maior consumo de água da floresta e também para remover o provável efeito do sombreamento sob a dinâmica de E_t .

Propriedades biofísicas da madeira

As propriedades biofísicas da madeira ligadas ao armazenamento de água foram obtidas a partir de núcelos coletados do tronco com auxílio de um trado de Pressler (20 cm de largura e ~5.15 mm de diâmetro). A partir dos núcleos removidos, utilizamos o método de secagem em estufa (Chave et al. 2009) para determinar as seguintes variáveis dessas amostras: (1) densidade da madeira, (2) teor saturado de água da madeira e a (3) quantidade total de água liberada da madeira

A densidade da madeira (WD, g cm⁻³) foi determinada de acordo com Stratton, Goldstein e Meinzer et al. (2000), utilizando a seguinte fórmula:

$$WD = \frac{M}{V}$$

onde M representa a massa secada da amostra e V é o volume da amostra saturada com água. A massa secada foi obtida secando as amostras em estufa a 65°C por cinco dias até atingirem peso constante. Usamos a definição de massa secada ao invés de massa seca uma vez que o processo de secagem que as amostras foram submetidas provavelmente não removeu toda a água de constituição química ligada as substâncias orgânicas da parede celular.

O teor saturado de água da madeira (WSWC) e a quantidade total de água liberada da madeira (CWR) foram determinados seguindo as abordagens de Zieminska et al. (2019) e Stratton, Goldstein e Meinzer (2000), respectivamente. Esse cálculo foi realizado usando as seguinte fórmula:

$$WSWC (\%) = \frac{M_s - M_d}{M_d} * 100$$

onde M_s representa a massa saturada com água da amostra de madeira e M_d é a massa secada

da amostra de madeira.

A quantidade total de água liberada da madeira (CWR, kg m⁻³) foi calculada como:

$$CWR = \frac{M_s - M_f}{V}$$

onde M_f é a massa fresca da amostra e V é o volume da amostra.

Para estimar a profundidade e a área do xilema ativo, foram usados os núcleos do tronco de cada árvore extaridos próximo ao local onde os sensores de fluxo de seiva foram posicionados. Determinamos a profundidade do xilema ativo pelo método de passagem de luz (Cosme et al. 2017) e removemos a profundidade da casca e do floema. O método de passagem da luz funciona com núcleos de madeira que recebem uma luz forte (usamos um smartphone) e dada a posição paralela da luz com a amostra, presume-se que onde há passagem de luz devido a vasos abertos, provavelmente a água também passa (Cosme et al. 2017). Calculamos a área total do xilema ativo utilizando a profundidade do xilema ativo e o diâmetro do xilema à altura do peito (DAP) da árvore. Calculamos a área da seção transversal do caule a partir do DAP e relacionamos com a área do xilema ativo para obter a razão entre a área do xilema ativo e a área da seção transversal da árvore.

Densidade de fluxo de seiva e uso de água

A densidade de fluxo de seiva (g cm⁻² h⁻¹) foi obtida utilizando sensores de fluxo de seiva com sonda de dissipação térmica (TDP; PlantSensors, Austrália) instalados no caule de 19 árvores logo acima da altura do peito (~1,30 m) e também próximos a copa. O método TDP consiste em sondas inseridas no xilema ativo posicionadas verticalmente a 10-15 cm uma da outra. A sonda superior foi aquecida a 0,2 W e a sonda inferior usada como referência e a diferença de temperatura foi relacionada à densidade do fluxo de seiva ou velocidade da seiva com base na relação estabelecida por Granier (1985, 1987).

$$F_d = aK^b$$

Onde F_d é a densidade do fluxo de seiva ($\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$), a é um coeficiente empírico (0,0119), b é o expoente da escala (1,23) e K é um índice de fluxo de seiva calculado a partir das diferenças de temperatura entre as duas sondas conforme a seguir:

$$K = \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T} - 1$$

Onde ΔT é a diferença de temperatura entre a sonda aquecida e não aquecida, e ΔT_{max} é a máxima diferença de temperatura entre as duas sondas que represente o fluxo zero, que aqui se presume ser atingida todas as noites.

Usamos o software Baseline, uma ferramenta interativa e de código aberto para processamento de dados de fluxo de seiva (Oishi et al. 2016) para obter os dados de k a partir de ΔT considerando que cada noite atingiu fluxo zero. O uso de água em toda a árvore foi calculado multiplicando-se a densidade do fluxo de seiva pela área do xilema ativo.

Utilizamos os sensores de fluxo de seiva localizados na base da árvore e na base da copa para quantificar a dinâmica do uso da água armazenada com base no uso de água em cada posição (Goldstein et al. 1998; Kocher et al. 2013). Os dados obtidos do sensor de fluxo de seiva superior deve ser mais firmemente acoplados a transpiração foliar do que o sensor na base devido ao uso de água armazenada que pode atrasar a resposta do fluxo de seiva nessa posição. Para testar este ponto, seguimos o método de Goldstein et al. (1998) onde o fluxo de seiva no topo foi primeiro normalizado usando o valor médio diário máximo durante o período analisado. Esses valores normalizados foram então divididos pela soma diária desses fluxos normalizados e depois multiplicados pelo fluxo total de seiva diário na base, estabelecendo-se que é igual à transpiração diária do indivíduo (Goldstein et al. 1998). Desta forma, obtivemos taxas de transpiração estimadas por hora. Esta conversão é baseada no princípio ou lei da conservação da massa, onde se assume que toda a água que passou pelo ponto A (base) passará pelo ponto B (topo) (Carrasco et al. 2015). A quantidade de água

armazenada utilizada foi obtida pela diferença entre o fluxo de seiva nas duas posições após as correções anteriores. Quando o fluxo de seiva no topo foi maior que o fluxo de seiva na base, assumimos que houve uso de água armazenada, e a soma diária desses fluxos resultou no uso diário de água armazenada (Goldstein et al. 1998; Scholz et al. 2004; Carrasco et al. 2015). A contribuição da água armazenada para o uso de água total foi quantificada por meio da razão entre a quantidade de água armazenada em relação ao uso diário total de água (Scholz et al. 2008).

Potencial hídrico foliar e trocas gasosas

Medições de potencial hídrico foliar (Ψ_{leaf}) e trocas gasosas foram realizadas em oito árvores. Estas medições foram realizadas num dia típico durante a estação seca de 2022 entre as 06h00 e as 17h00 entre o intervalo de 1 a 2 horas, que era o tempo para atingir todas as árvores com o elevador hidráulico (grua) e então reiniciar as medições. Um elevador hidráulico foi utilizado para acessar a folhagem da copa entre 20 e 25 m de altura (modelo S65, Genie). As amostras foram selecionadas de acordo com os seguintes critérios: (i) acesso pelo grua e que fosse possível a realização de medições contínuas ao longo do dia, (ii) folhas expostas à radiação solar, (iii) folhagem intacta e sem epífitas, e (iv) folhas totalmente expandidas. Utilizamos um sistema de troca gasosa (Li-6400XT, LI-COR, Lincoln, NE, EUA) para medir a fotossíntese (A), transpiração (E_t) e condutância estomática (g_s). A concentração de referência de CO_2 foi mantida constante em $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$ e a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) foi ajustada para corresponder às condições ambientais prevalentes.

Após medições de trocas gasosas, as folhas foram destacadas, ensacadas e enviadas para o solo da floresta, onde foi medido o potencial hídrico em até cinco minutos usando uma câmara de pressão Scholander (Scholander et al. 1965).

Condutância hidráulica e capacitância hidráulica

A condutância hidráulica do solo as folhas nos galhos por unidade de área do xilema ativo (K_{sa}) foi determinada a partir da equação abaixo seguindo a abordagem de Meinzer et al. (2003).

$$K_{sa} = \frac{F_d}{\Delta\Psi_{leaf}}$$

Onde: F_d é a densidade máxima de fluxo de seiva no dia da coleta do potencial hídrico foliar (descrito na próxima seção). $\Delta\Psi_{leaf}$ corresponde à diferença do potencial hídrico foliar entre o amanhecer (medido entre às 06:00-07:00) e o mínimo registrado ao longo do dia. A capacitância pode afetar a condutância hidráulica, por isso selecionamos os valores máximos de F_d que ocorrem quando há a menor diferença entre o fluxo de seiva na base e no topo, semelhante a Scholz et al. (2007).

A condutância hidráulica foliar (K_{leaf}) foi estimada dividindo a máxima transpiração foliar diária (E_{max}) em relação a variação diária do potencial hídrico mínimo e o da madrugada ($\Delta\Psi_{leaf}$) de acordo com:

$$K_{leaf} = \frac{E_{max}}{\Delta\Psi_{leaf}}$$

A capacitância individual das árvores (kg MPa^{-1}) foi calculada como a razão entre o uso de água armazenada e a diferença de potencial hídrico entre a madrugada e o potencial hídrico mínimo diário (Meinzer et al. 2004). Também usamos o intervalo de tempo do fluxo de seiva entre os sensores da base e do topo como uma medida de armazenamento de água nas árvores (Chen et al. 2015) e capacitância (Phillips et al. 2008) por meio de análise de correlação cruzada.

Capacitância foliar, ponto de perda de turgor e módulo de elasticidade

A capacitância foliar (C_{leaf}) foi obtida a partir de curvas de pressão-volume (curvas PV) de folhas excisadas, nas quais o potencial hídrico e a massa de água foram medidos repetidamente em laboratório enquanto secavam em uma bancada. A capacitância relativa da folha foi obtida considerando a inclinação da fase inicial de liberação de água na folha entre o potencial hídrico da folha e o conteúdo relativo de água (pré-perda de turgor) (por exemplo, Blackman e Brodribb, 2011).

O ponto de perda de turgor (π_{ltp}) foi considerado como o potencial hídrico onde a pressão de turgor é igual à pressão osmótica (Junior et al. 2020) e ocorre o murchamento das folhas (Bartlett et al. 2012). O ponto de perda de turgor (π_{ltp}) foi calculado identificando o ponto de inflexão na curva PV de $1/\Delta\Psi_{folha}$ em relação ao conteúdo relativo de água.

O módulo de elasticidade (ϵ) foi obtido segundo Bartlett et al. (2012) de acordo com a fórmula:

$$\epsilon = \frac{\Delta\Psi_p}{\Delta RWC_{total}}$$

Onde $\Delta\Psi_p$ é a variação do potencial de pressão da folha e ΔRWC_{total} é a variação do teor relativo de água da folha obtido a partir das curvas pressão volume das folhas.

RESULTADOS

A densidade do fluxo de seiva na base e no topo das árvores variou diurnamente, com fluxos mais elevados ao meio-dia e fluxos mais baixos à noite (Figura 1). A densidade máxima de fluxo de seiva foi significativamente maior no topo ($15,6 \text{ g cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$) do que na base ($9,3 \text{ g cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$) (teste t, $df=12$, $t=-3,37$, $p=0,005$). Entretanto, foram observadas diferenças temporais entre a densidade de fluxo de seiva nas duas posições ao longo do tronco no

período da manhã. O fluxo de seiva no topo começou perto do nascer do sol para todas as árvores, enquanto o fluxo de seiva na base foi atrasado em média cerca de 35 minutos. O tempo de atraso médio entre os sensores da base e do topo variou de um minuto em uma árvore *Inga splendens*, com densidade de madeira de $0,48 \text{ g cm}^{-3}$, a 36,6 minutos em *Abarema jupunba* com densidade de madeira de $0,74 \text{ g cm}^{-3}$.

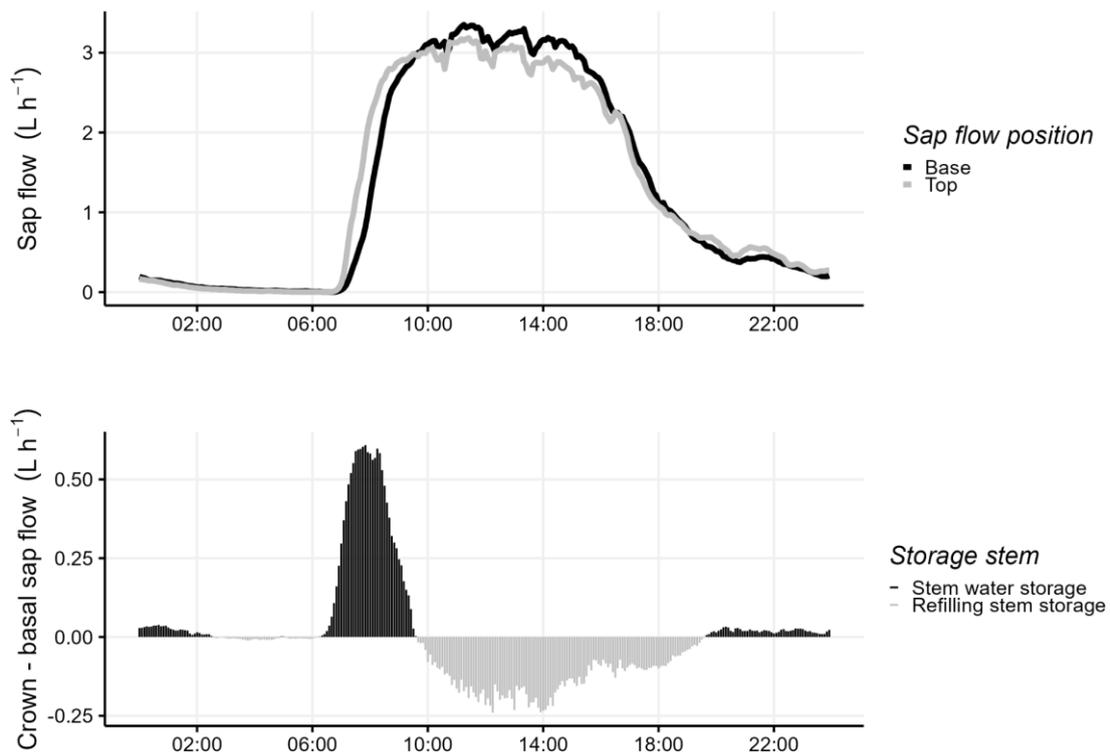


Figura 1. a) Variação do fluxo de seiva nas posições de base e topo do tronco de uma árvore de *Andira parviflora* para um dia típico da estação seca. (b) Diferença temporal entre o fluxo de seiva no topo em relação ao fluxo de seiva na base para *Andira parviflora*.

Utilizamos as diferenças temporais e de magnitude entre o fluxo de seiva na base e no topo do tronco para investigar o acesso à água armazenada e sua contribuição para a transpiração diária total. Para a maioria das espécies, o uso da água armazenada ocorreu do nascer do sol ao meio-dia, embora algumas espécies utilizassem a água armazenada no período da tarde. O consumo médio de água armazenada foi de 17,7 L, e a água armazenada contribuiu com

22,1% do total diário de E_t com variação de 12% a 57% ($p < 0,001$, Figura 3). A contribuição da água armazenada para a transpiração diária total não foi afetada pelo tamanho da árvore (Figura 3). DAP e SAP explicaram 31% ($p = 0,04$) e 71% ($p = 0,04$) do uso de água armazenada, respectivamente (Figura 2). O uso de água armazenada explicou 65% do consumo diário de água ($p < 0,001$).

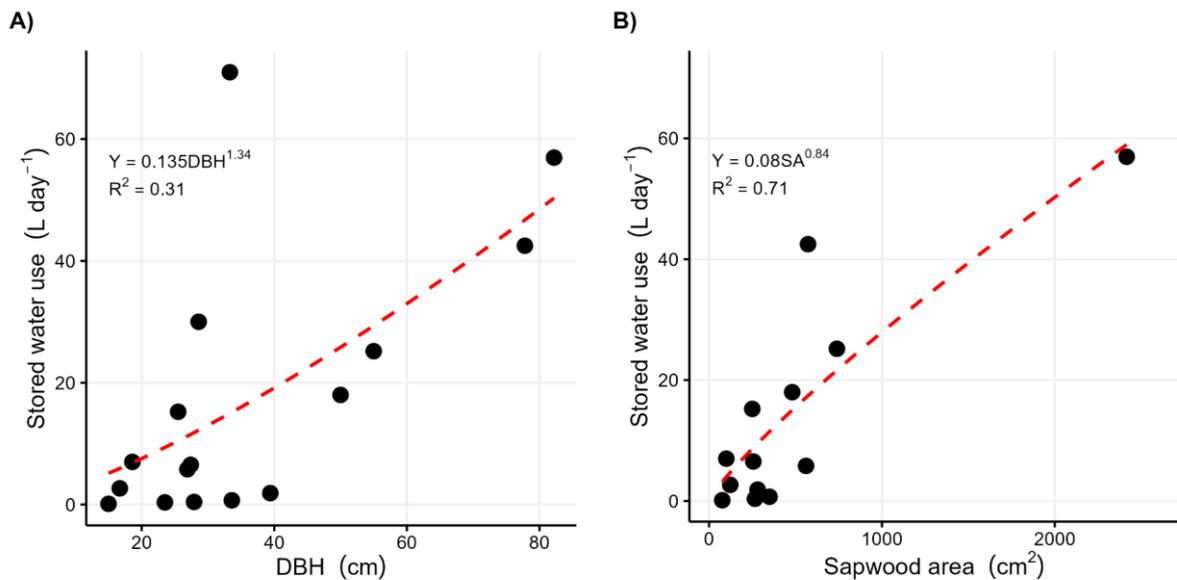


Figura 2. Uso diário de água armazenada em função de a) diâmetro à altura do peito e b) área de xilema ativo para 19 árvores na Amazônia Central.

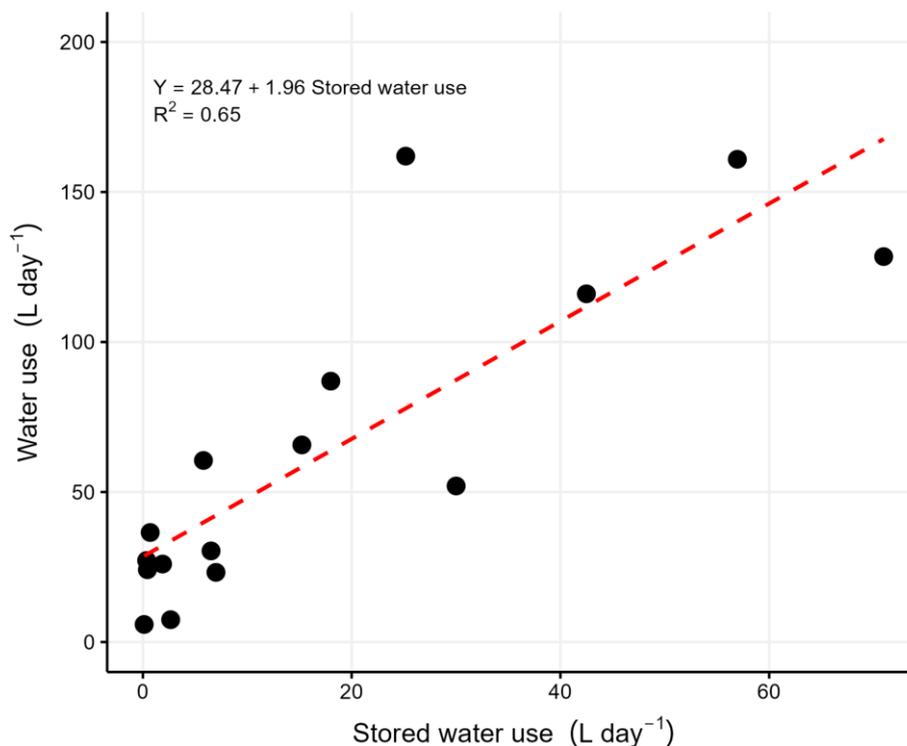


Figura 3. Uso de água em função do uso de água armazenada para 19 árvores na Amazônia Central.

A densidade da madeira emergiu como um importante preditor direto e indireto da liberação e armazenamento de água na madeira. A quantidade total de água liberada da madeira foi correlacionada com a densidade da madeira ($R^2 = 0,41$, $p = 0,007$; Figura 4A). A densidade da madeira também foi correlacionada com a capacidade de armazenamento de água, avaliada pelo teor saturado de água da madeira ($R^2 = 0,71$, $p < 0,001$; Figura 4B). A densidade da madeira também foi significativamente correlacionada com a razão entre a área do xilema ativo e área da seção transversal da árvore ($R^2 = 0,49$, $p = 0,001$; Figura 4C), que por sua vez influenciou a densidade máxima de fluxo diário de seiva ($R^2 = 0,49$, $p = 0,001$; Figura 3; Figura 4D).

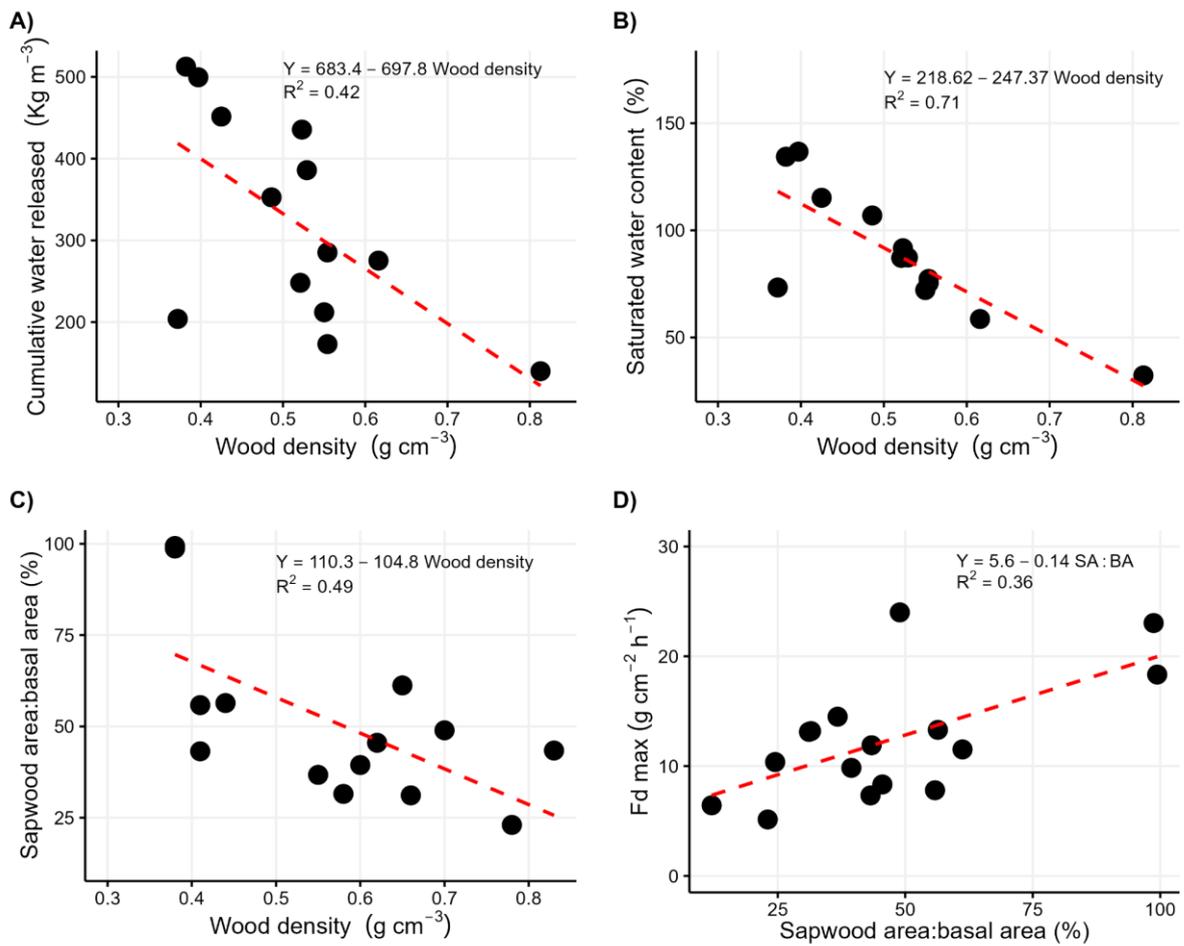


Figure 4. Relações entre densidade da madeira e variáveis ligadas ao armazenamento e transporte de água, bem como o investimento da árvore em tecido condutor em relação à sua área transversal do caule a altura de 1,30 metros do solo. a) A quantidade total de água liberada da madeira em função da densidade da madeira, b) teor saturado de água em função da densidade da madeira; c) razão entre a área de xilema ativo e a área da seção transversal do caule em função da densidade da madeira e d) densidade máxima do fluxo de seiva em função da razão entre a área de xilema ativo e a área da seção transversal do caule..

A duração do máximo fluxo de seiva ao longo do dia medido na base das copas variou de 1 hora e 25 minutos a 5 horas, com média de 2 horas e 44 minutos. A quantidade total de água liberada da madeira foi correlacionada com a duração do máximo fluxo de seiva ($R^2=0,22$, $p=0,06$; Figura 5A). O intervalo de tempo ou tempo de atraso entre os sensores de fluxo de seiva do topo e da base também foi correlacionado com a duração do máximo fluxo de seiva

($R^2=0,35$, $p=0,007$; Figura 5B).

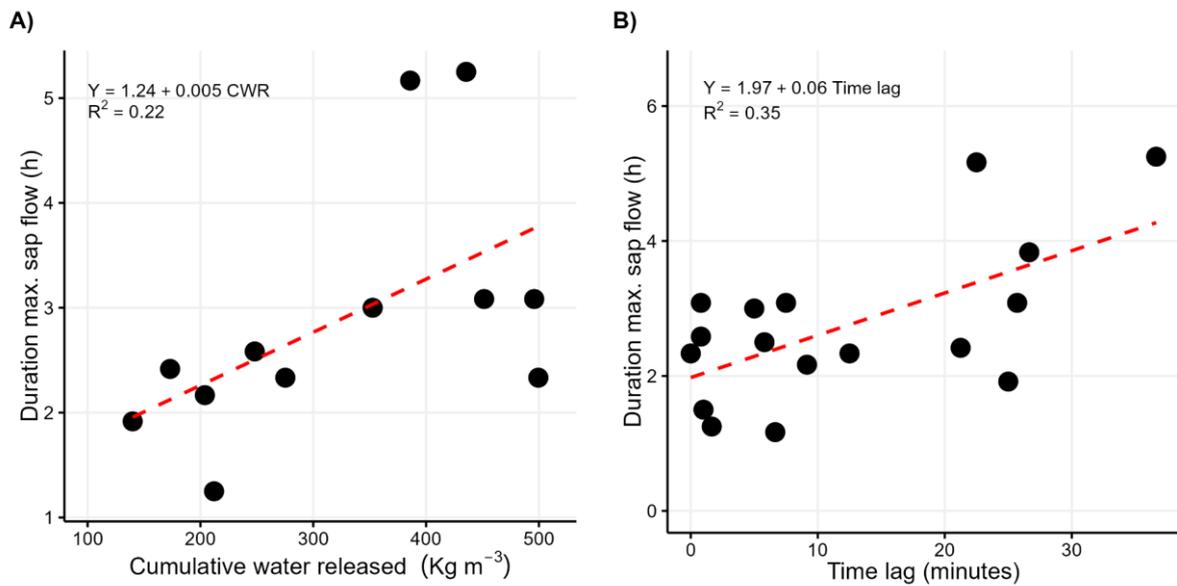


Figura 5) a) Quantidade total de água liberada da madeira em função da duração do máximo fluxo de seiva e b) intervalo de tempo ou tempo de atraso entre o sensor de fluxo de seiva da base e do topo vs a duração do máximo fluxo de seiva.

A capacitância hidráulica (C) foi correlacionado com o potencial hídrico foliar mínimo ($R^2=0,62$, Figura 6A) e com o gradiente do potencial hídrico entre a zona radicular e a copa (Figura 6 - B, $R^2=0,40$). Árvores com maior C sustentaram maior condutância estomática ($R^2=0,65$, Figura 6C) e máxima fotossíntese ($R^2=0,85$, Figura 6D).

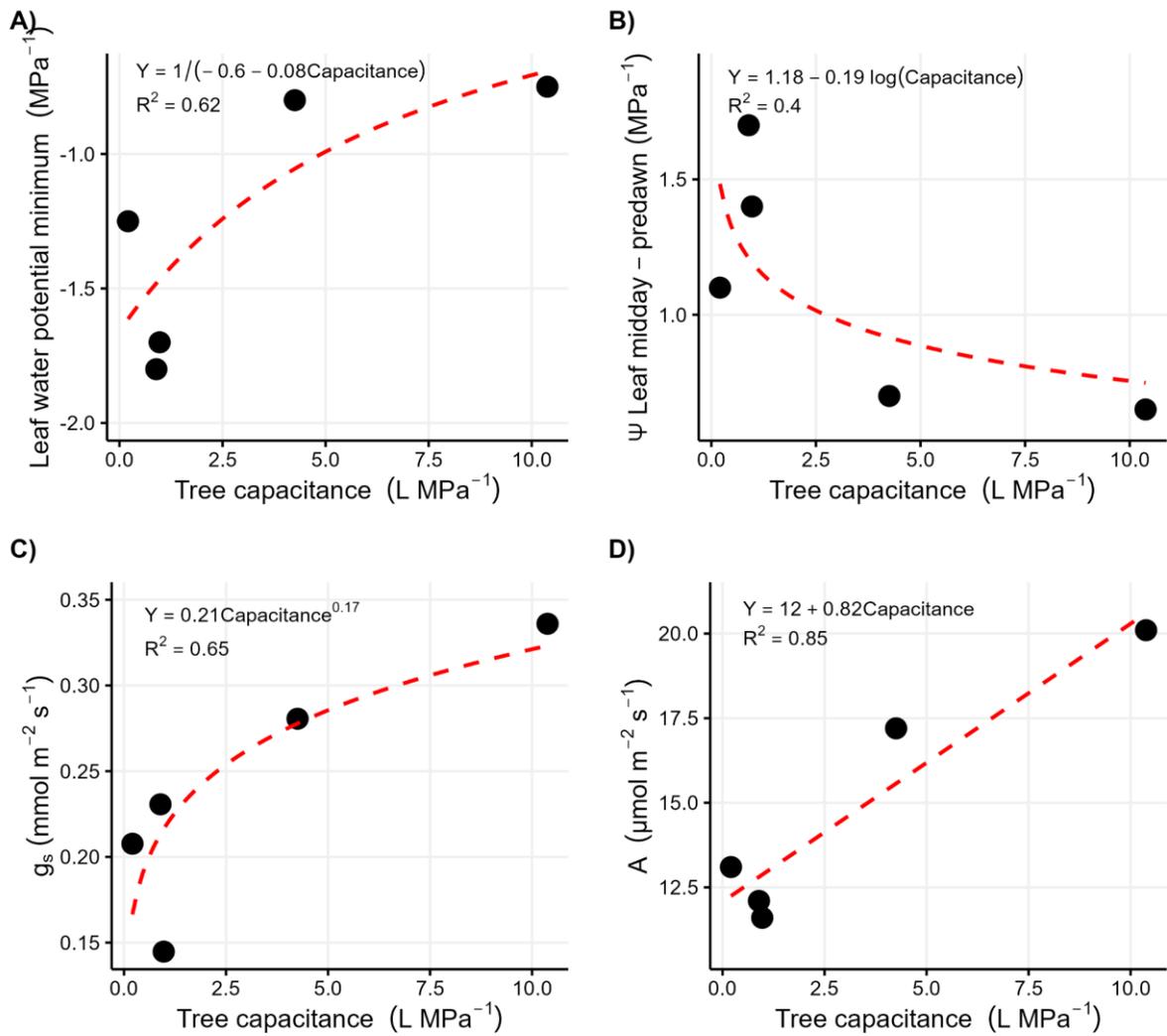


Figura 6) a) Capacitância hidráulica em relação ao Ψ_{\min} , b) $\Psi_{\text{midday-predawn}}$, c) condutância estomática (g_s) e d) máxima fotossíntese diária (A).

Semelhante à C da árvore, a capacitância foliar relativa obtida a partir de curvas de pressão-volume também foi relacionada ao potencial hídrico foliar mínimo, ao gradiente de potencial hídrico entre solo e copa e às trocas gasosas (Figura 7).

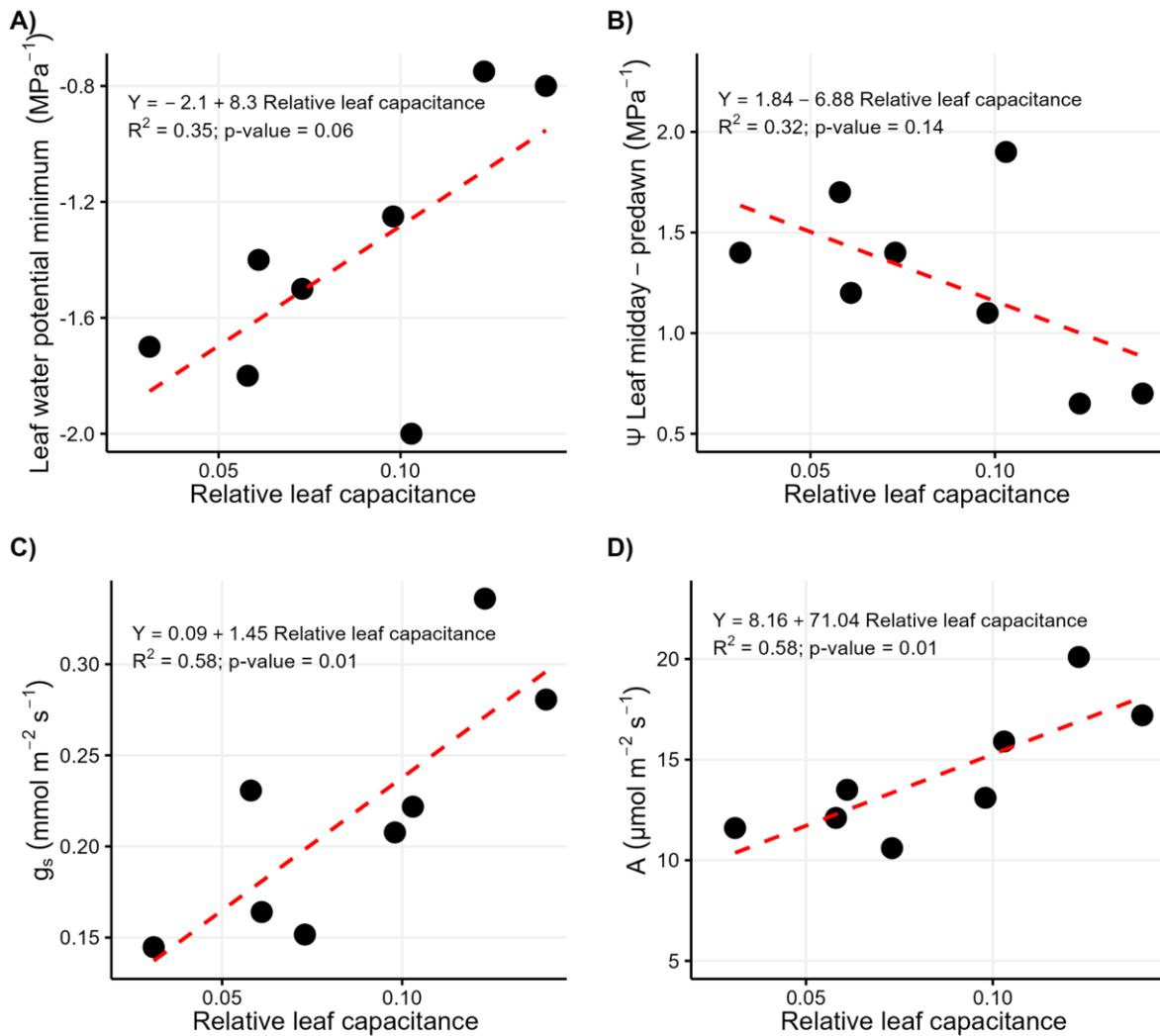


Figura 7) Capacitância foliar relativa em relação a a) Ψ_{\min} , b) $\Psi_{\text{midday-predawn}}$, c) condutância estomática (g_s) e d) máxima fotossíntese diária (A).

O módulo de elasticidade da folha (ϵ) emergiu como um importante preditor da capacitância e das trocas gasosas no nível foliar. ϵ explicou quase toda a variação na capacitância relativa da folha ($R^2=0,95$; Figura 8A) e também foi significativamente correlacionado com a fotossíntese ($R^2=0,89$; Figura 8B), e explicou mais da metade da variação na condutância estomática ($R^2 =0,59$; Figura 8C).

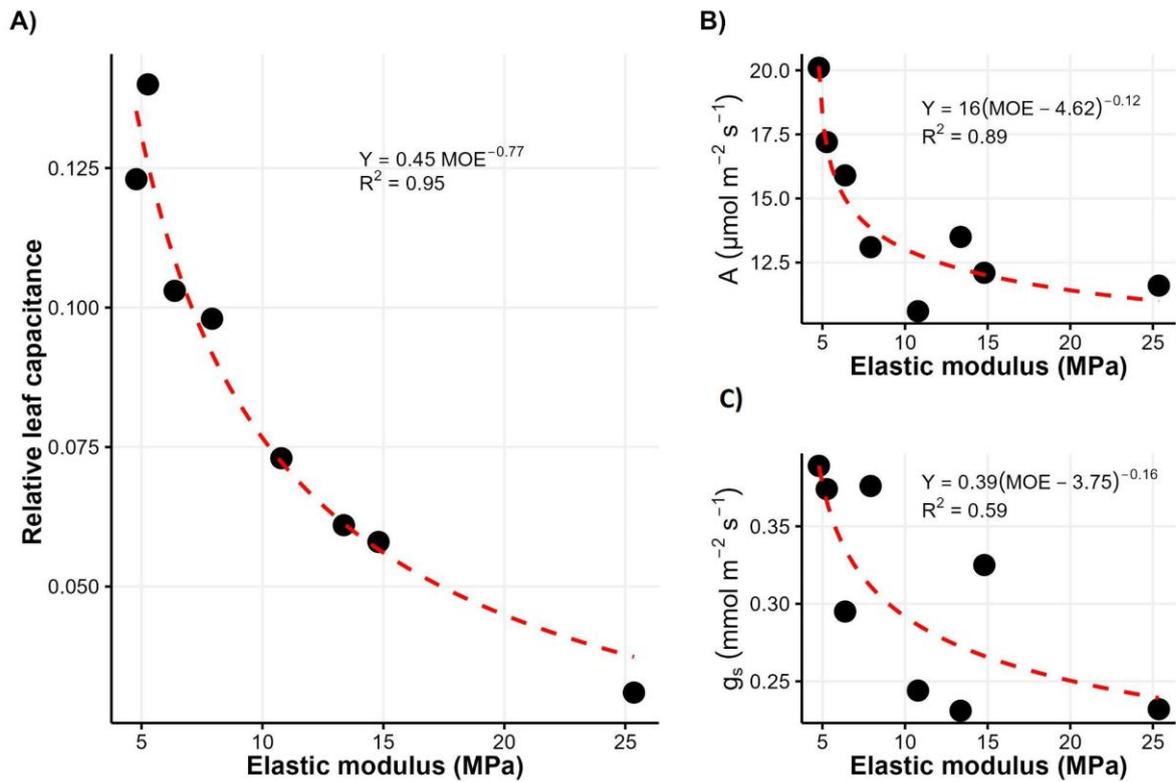


Figura 8. Módulo de elasticidade da folha em relação a a) capacitância foliar relativa, b) condutância estomática (g_s) e, c) máxima fotossíntese diária (A).

A condutância hidráulica da árvore inteira e a condutância hidráulica foliar foram correlacionadas com a capacitância relativa da folha ($R^2 = 0,82$ e $0,52$, respectivamente, Figura 9). A capacitância relativa da folha também foi correlacionada com a densidade máxima de fluxo de seiva ($R^2=0,48$) e a transpiração foliar ($R^2=0,37$; Figura 9).

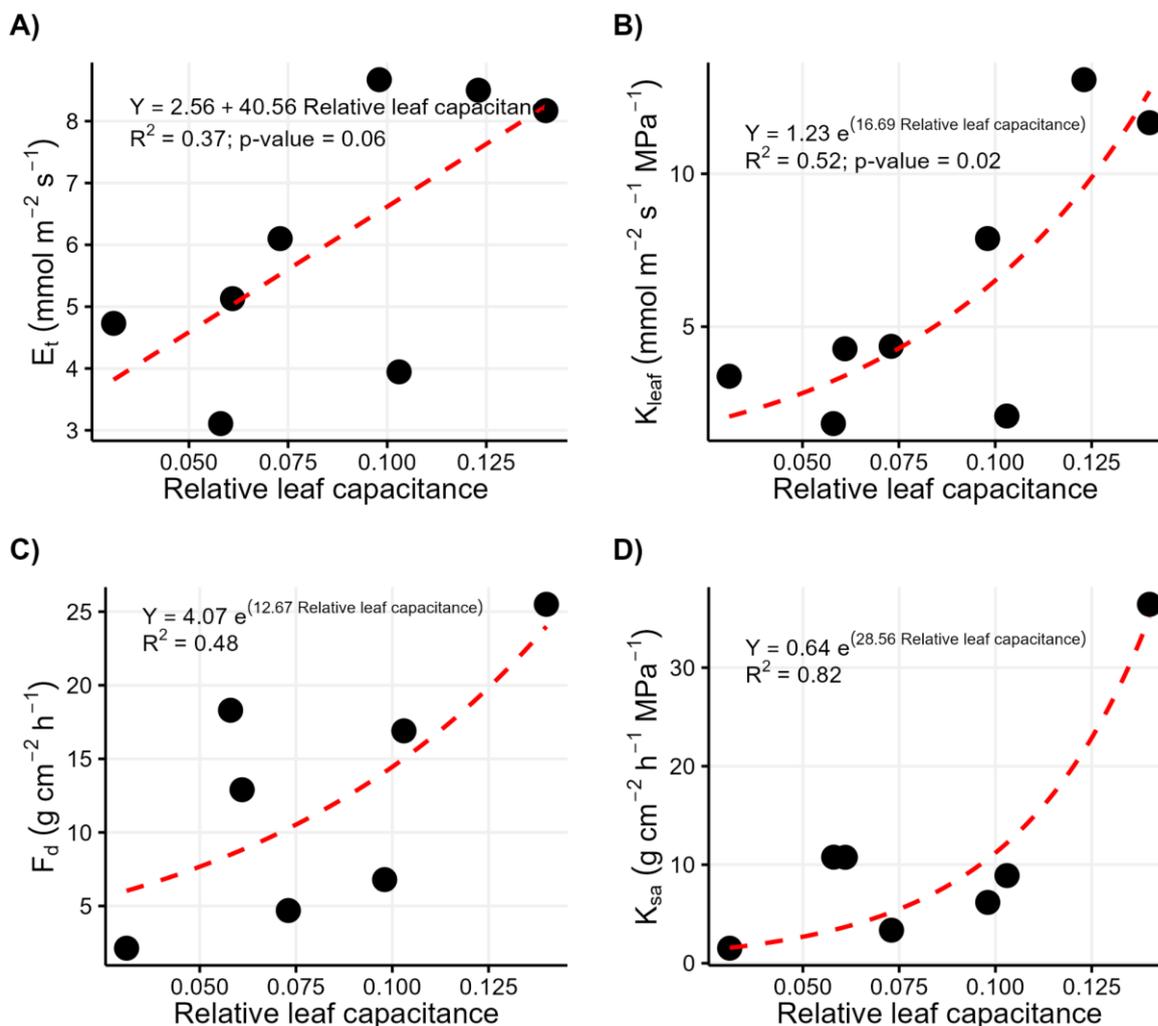


Figura 9) Capacitância foliar relativa em relação a a) transpiração foliar máxima, b) condutância hidráulica foliar, c) densidade máxima de fluxo de seiva e d) condutância hidráulica de toda a árvore.

DISCUSSÃO

As espécies neste local na floresta amazônica central exibiram uma ampla gama de taxas de transpiração e capacitância, mas havia padrões consistentes nas relações subjacentes a essa variabilidade. A E_t total diária aumentou com o tamanho da árvore, em particular, com a área do xilema ativo (Figura 2A-B) e com o uso de água armazenada (Figura 3). A quantidade total de água liberada da madeira e o teor saturado de água na madeira aumentaram com a densidade da madeira (Figura 4A-B). A densidade da madeira foi

negativamente correlacionada com a razão entre a área do xilema ativo e área da seção transversal do caule (Figura 4C), que por sua vez aumentou com o máximo fluxo de seiva (Figura 4D). A duração do máximo fluxo de seiva aumentou com a quantidade total de água liberada da madeira e o intervalo de tempo entre o fluxo de seiva base e topo (Figura 5A-B). O Ψ_{\min} aumentou com a capacitância da árvore, enquanto o $\Psi_{\text{midday-predawn}}$ diminuiu (Figura 6 e 7). A condutância estomática (g_s) e a fotossíntese (A) aumentaram com a capacitância da árvore (Figura 6). A capacitância foliar relativa manteve relações na mesma direção que a capacitância da árvore com g_s , A , Ψ_{\min} e $\Psi_{\text{midday-predawn}}$ (Figura 7). A transpiração foliar e a densidade máxima do fluxo de seiva aumentaram com a capacitância relativa da folha, assim como a condutância hidráulica da folha e da árvore inteira (Figura 9). Em conjunto, vemos uma forte regulamentação da utilização do armazenamento de água ao nível das árvores e das folhas e o seu impacto nas trocas gasosas ao nível das folhas.

Uso de água armazenada aumenta com o tamanho da árvore

Árvores maiores tiveram maior uso de água armazenada (Figura 2A-B), o que posteriormente se traduziu em maior uso diário total de água (Figura 3). Árvores maiores têm uma área maior de xilema ativo (Berry et al. 2017; Aparecido et al. 2018; Aparecido et al. 2019; Spanner et al. 2022) disponível para conduzir e armazenar água (Goldstein et al. 1998). Esse maior uso da água armazenada nas árvores de grande porte é importante para mitigar os grandes desequilíbrios entre demanda e oferta de água causados pela maior altura desses indivíduos (Meinzer et al. 2004; Gorgens et al. 2020; Lima et al. 2021).

A copa das árvores altas está sujeita a maior incidência de radiação solar, temperaturas mais elevadas e menor umidade relativa do ar (Deng et al. 2021), causando maior demanda por E_t . Em contraste, árvores mais altas podem ter maior resistência ao transporte de água para a copa devido ao maior comprimento do caminho hidráulico e à queda hidrostática do potencial hídrico com a altura (Cruiziet et al. 2002; Garcia et al., 2021). Em conjunto, a

maior demanda por E_t , juntamente com a maior resistência hidráulica nas árvores mais altas, poderia promover uma maior vulnerabilidade hidráulica, e portanto uma maior utilização da água armazenada poderia servir para aliviar este risco de embolia relacionado com a maior altura.

A densidade da madeira influencia o uso da água armazenada

A densidade da madeira é uma medida do investimento em matéria seca em relação ao volume verde e oferece informações valiosas sobre a alocação de recursos nas plantas em relação à sua economia de água e carbono (Chave et al. 2009). Árvores com baixa densidade de madeira apresentam maior capacidade de armazenar água por unidade de volume de madeira e maior capacidade de liberar água armazenada devido à composição e arranjo celular (Jupa et al. 2016). Árvores de baixa densidade de madeira também geralmente possuem vasos mais largos, o que aumenta sua condutividade hidráulica (Poorter et al. 2010), facilitando assim altas taxas de E_t . Embora a condutividade hidráulica impulse altas taxas de E_t , descobrimos que o armazenamento de água e a capacitância desempenham um papel significativo na condução da duração em que E_t é máximo ao longo do dia. A quantidade total de água liberada da madeira, o teor de água saturada da madeira e a área total do alburno: a área da seção transversal das árvores aumentou com a diminuição da densidade da madeira (Figura 4A-C), de modo que espécies de baixa densidade de madeira deveriam ser capazes para suportar maior E_t por períodos de tempo mais longos. Esses impactos estruturais na disponibilidade de água armazenada influenciaram de fato o E_t de toda a árvore, em que as árvores com maior área de alburno: a área transversal e a liberação cumulativa de água, respectivamente, tiveram maior densidade de fluxo de seiva (Figura 4D) e maior duração do fluxo máximo de seiva (Figura 5A). Além disso, uma maior duração do fluxo máximo de seiva foi associada a um maior uso de água em toda a árvore, indexado pelo intervalo de tempo entre o fluxo de seiva na base e no topo das árvores (Figura 5B).

Estes resultados são consistentes com os das árvores do Panamá, onde a duração do fluxo máximo de seiva aumentou com o uso da água armazenada (Goldstein et al. 1998). A utilização crescente de água armazenada em árvores com menor densidade de madeira fornece informações sobre os mecanismos subjacentes ao modo como as espécies com menor densidade de madeira têm taxas de crescimento mais elevadas (Poorter et al. 2008; Chave et al. 2009; Hietz et al. 2017). Árvores de crescimento mais rápido requerem maior absorção de carbono, que pode ser apoiada através do fornecimento adicional de água para Et (Carrasco et al. 2015; Janssen et al., 2019) e, portanto, maior g_s e A.

A água armazenada influencia as trocas gasosas no nível das folhas das árvores do dossel

A variação no uso de água armazenada, na capacitância da madeira e na árvore inteira variou com as propriedades ao nível da folha de uma maneira consistente com o aumento do uso de água armazenada, proporcionando à folhagem maior disponibilidade de água. O aumento da capacitância hidráulica foi associado a um Ψ_{\min} menos negativo e menor $\Psi_{\text{midday-predawn}}$ (Figura 6A-B), consistente com a capacitância maximizando o fornecimento de água para a folhagem. Da mesma forma, g_s e A aumentaram com a capacitância da árvore (Figura 6C-D). Esses resultados são consistentes com a expectativa de que uma maior disponibilidade de água armazenada para toda a árvore pode reduzir o risco de embolia através da minimização da queda no Ψ_{\min} e pode maximizar as trocas gasosas através do fornecimento de mais água (Goldstein et al. 1998; Meinzer et al. 2008). Estes resultados apoiam ainda mais a ideia de que árvores com menor densidade de madeira podem atingir taxas de crescimento mais elevadas através da utilização de água armazenada para suportar taxas mais elevadas de trocas gasosas foliares (Carrasco et al. 2015).

Apesar da menor contribuição relativa da água foliar para o conteúdo de água de toda a árvore (Waring and Running, 1978), C_{leaf} exibiu relações com Ψ_{\min} , $\Psi_{\text{midday-predawn}}$, g_s e A da mesma maneira que a capacitância de toda a árvore (Figura 7). Além disso, o aumento da

C_{leaf} foi relacionado ao aumento da transpiração tanto nas folhas como em toda a árvore (Figura 9A-B), bem como ao aumento da condutância hidráulica tanto nas folhas como em toda a árvore (Figura 9B-D). A capacitância foliar é um importante regulador das respostas das folhas às flutuações na transpiração (Stratton et al. 2000; Blackman e Brodribb, 2011) e tem grandes impactos nas trocas gasosas (Mencuccini 2003; Sack et al. 2003). A C_{leaf} , em particular, está relacionada com a massa foliar por unidade de área (Blackman e Brodribb, 2011) e possivelmente com variáveis ligadas à anatomia foliar (Blackman e Brodribb, 2011; Nadal et al. 2018). O módulo de elasticidade, variável ligada à estrutura anatômica foliar, teve forte associação com a C_{leaf} (Figura 8A), o que demonstra uma clara ligação entre a C_{leaf} e a elasticidade dos tecidos foliares (Nadal et al. 2018). O módulo de elasticidade foi um importante preditor da fotossíntese e condutância (Nadal et al. 2018; Figura 9).

Implicações do uso de água armazenada para a sobrevivência e crescimento das árvores

A água armazenada foi uma estratégia importante ligada à hidráulica e à economia de carbono das árvores em nosso local de estudo na floresta amazônica. Árvores com menor densidade de madeira tiveram maior uso de água armazenada e capacitância no nível da árvore e das folhas e foram capazes de manter potenciais hídricos menos negativos, maiores taxas de trocas gasosas e maior condutância hidráulica. Esses resultados têm implicações para a sobrevivência e o crescimento das árvores. As árvores com uma maior quantidade de água armazenada disponível para amortecer os desequilíbrios entre o abastecimento e a procura de água poderiam ter menos probabilidades de sofrer falhas hidráulicas e mortalidade associada, evitando níveis catastróficos de embolia (Hammond et al. 2021; McDowell et al. 2022). Isto é particularmente relevante para árvores altas que apresentam potenciais hídricos mais negativos e maior risco de embolia (Fernandez de Una et al. 2023). No entanto, a falha hidráulica é uma função do potencial hídrico mínimo em relação à resistência à embolia do xilema, pelo que inferências mais fortes sobre a relação entre a

utilização da água armazenada e a falha hidráulica também exigirão o exame da vulnerabilidade hidráulica das espécies (Rowland et al. 2015). O uso de água armazenada para manter a sobrevivência pode ser particularmente importante nesta região onde as profundidades de enraizamento são relativamente menos profundo (Nepstad et al. 2007) e a resistência do xilema à embolia é relativamente baixa (Santiago et al. 2008). Árvores com maior uso de água armazenada também podem ter uma vantagem evolutiva nas florestas amazônicas, onde a disponibilidade de luz é uma restrição dominante ao crescimento, porque as taxas mais altas de troca gasosa em espécies de baixa densidade podem se traduzir em crescimento mais rápido e, portanto, na obtenção de posições de dossel onde a competição por luz é menor. A forte variação na capacitância e no uso de água armazenada com a densidade da madeira também pode ser importante para impulsionar a variação na sobrevivência e no crescimento entre as espécies (Christoffersen et al. 2016; Oliveira et al. 2021) dada a ampla gama de variação na densidade da madeira dentro destes hiper-florestas diversas.

REFERENCIAS

- 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(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Amaral, M. R. M., Lima, A. J. N., Higuchi, F. G., dos Santos, J., & Higuchi, N. (2019). Dynamics of tropical forest twenty-five years after experimental logging in central amazon mature forest. *Forests*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/f10020089>
- Andrade, J. L., Meinzer, F. C., Goldstein, G., Holbrook, N. M., Cavelier, J., Jackson, P., & Silvera, K. (1998). International Association for Ecology Regulation of Water Flux through Trunks, Branches, and Leaves in Trees of a Lowland. In *Source: Oecologia* (Vol. 115, Issue 4).
- Aparecido, L. M. T., Dos Santos, J., Higuchi, N., & Kunert, N. (2019). Relevance of wood anatomy and size of amazonian trees in the determination and allometry of sapwood area. *Acta Amazonica*, 49(1), 1–10. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201800961>
- Aparecido, L. M. T., Miller, G. R., Cahill, A. T., & Moore, G. W. (2016). Comparison of tree transpiration under wet and dry canopy conditions in a Costa Rican premontane tropical forest. *Hydrological Processes*, 30(26), 5000–5011. <https://doi.org/10.1002/hyp.10960>

- Aragão, L. E. O. C., Malhi, Y., Roman-Cuesta, R. M., Saatchi, S., Anderson, L. O., & Shimabukuro, Y. E. (2007). Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. *Geophysical Research Letters*, *34*(7). <https://doi.org/10.1029/2006GL028946>
- Barros, F. de 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., 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*(3), 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*(5), 393–405. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01751.x>
- Berry, Z. C., Looker, N., Holwerda, F., Gómez Aguilar, L. R., Ortiz Colin, P., González Martínez, T., & Asbjornsen, H. (2018). Why size matters: The interactive influences of tree diameter distribution and sap flow parameters on upscaled transpiration. *Tree Physiology*, *38*(2), 264–276. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx124>
- Blackman, C. J., & Brodribb, T. J. (2011). Two measures of leaf capacitance: Insights into the water transport pathway and hydraulic conductance in leaves. *Functional Plant Biology*, *38*(2), 118–126. <https://doi.org/10.1071/FP10183>
- Brienen, R. J. W., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., Lopez-Gonzalez, G., Monteagudo-Mendoza, A., Malhi, Y., Lewis, S. L., Vásquez Martínez, R., Alexiades, M., Álvarez Dávila, E., Alvarez-Loayza, P., Andrade, A., Aragão, L. E. O. C., Araujo-Murakami, A., Arets, E. J. M. M., Arroyo, L., ... Zagt, R. J. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, *519*(7543), 344–348. <https://doi.org/10.1038/nature14283>
- Brum, M., Gutiérrez López, J., Asbjornsen, H., Licata, J., Pypker, T., Sanchez, G., & Oiveira, R. S. (2018). ENSO effects on the transpiration of eastern Amazon trees. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *373*(1760), 20180085. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0085>
- Bucci, S. J., Goldstein, G., Scholz, F. G., & Meinzer, F. C. (2016). *Physiological Significance of Hydraulic Segmentation, Nocturnal Transpiration and Capacitance in Tropical Trees: Paradigms Revisited* (pp. 205–225). https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5_9
- Carrasco, L. O., Bucci, S. J., Di Francescantonio, D., Lezcano, O. A., Campanello, P. I., Scholz, F. G., Rodriguez, S., Madanes, N., Cristiano, P. M., Hao, G.-Y., Holbrook, N. M., & Goldstein, G. (2015). Water storage dynamics in the main stem of subtropical tree species differing in wood density, growth rate and life history traits. *Tree Physiology*, *35*(4), 354–365. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu087>
- Cermak, J., Kucera, J., Bauerle, W. L., Phillips, N., & Hinckley, T. M. (2007). Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree Physiology*, *27*(2), 181–198. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.2.181>
- Chauvel, A., Lucas, Y., & Boulet, R. (1987). On the genesis of the soil mantle of the region of Manaus, Central Amazonia, Brazil. In *Experientia* (Vol. 43).
- 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*(4), 351–366. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>

- Chen, Y. J., Bongers, F., Tomlinson, K., Fan, Z. X., Lin, H., Zhang, S. Bin, Zheng, Y. L., Li, Y. P., Cao, K. F., & Zhang, J. L. (2016). Time lags between crown and basal sap flows in tropical lianas and co-occurring trees. *Tree Physiology*, *36*(6), 736–747. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv103>
- Christoffersen, B. O., Gloor, M., Fauset, S., Fyllas, N. M., Galbraith, D. R., Baker, T. R., Kruijt, B., Rowland, L., Fisher, R. A., Binks, O. J., Sevanto, S., Xu, C., Jansen, S., Choat, B., Mencuccini, M., McDowell, N. G., & Meir, P. (2016a). Linking hydraulic traits to tropical forest function in a size-structured and trait-driven model (TFS v.1-Hydro). *Geoscientific Model Development*, *9*(11), 4227–4255. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4227-2016>
- Christoffersen, B. O., Gloor, M., Fauset, S., Fyllas, N. M., Galbraith, D. R., Baker, T. R., Kruijt, B., Rowland, L., Fisher, R. A., Binks, O. J., Sevanto, S., Xu, C., Jansen, S., Choat, B., Mencuccini, M., McDowell, N. G., & Meir, P. (2016b). Linking hydraulic traits to tropical forest function in a size-structured and trait-driven model (TFS v.1-Hydro). *Geoscientific Model Development*, *9*(11), 4227–4255. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4227-2016>
- Cosme, L. H. M., Schiatti, 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*(1), 113–125. <https://doi.org/10.1111/nph.14508>
- Cruziat, P., Cochard, H., & Améglio, T. (2002). Hydraulic architecture of trees: Main concepts and results. In *Annals of Forest Science* (Vol. 59, Issue 7, pp. 723–752). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/forest:2002060>
- Davies, S. J., Abiem, I., Abu Salim, K., Aguilar, S., Allen, D., Alonso, A., Anderson-Teixeira, K., Andrade, A., Arellano, G., Ashton, P. S., Baker, P. J., Baker, M. E., Baltzer, J. L., Basset, Y., Bissiengou, P., Bohlman, S., Bourg, N. A., Brockelman, W. Y., Bunyavejchewin, S., ... Zuleta, D. (2021). ForestGEO: Understanding forest diversity and dynamics through a global observatory network. *Biological Conservation*, *253*, 108907. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108907>
- de Lima, R. B., Görgens, E. B., Elias, F., de Abreu, J. C., Baia, A. L., de Oliveira, C. P., da Silva, D. A. S., Batista, A. P. B., Lima, R. C., Sotta, E. D., Ferreira, R. L. C., da Silva, J. A. A., & Guedes, M. C. (2021). Height-diameter allometry for tropical forest in northern Amazonia. *PLoS ONE*, *16*(12 December). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255197>
- Deng, Y., Dong, J., Zhang, W., Yuan, S., Tan, Z., Song, Q., Deng, X., & Cao, M. (2022). Quantifying the vertical microclimate profile within a tropical seasonal rainforest, based on both ground-and canopy-referenced approaches. *IForest*, *15*(1), 24–32. <https://doi.org/10.3832/ifer3780-014>
- Doughty, C. E., Metcalfe, D. B., Girardin, C. A. J., Amézquita, F. F., Cabrera, D. G., Huasco, W. H., Silva-Espejo, J. E., Araujo-Murakami, A., da Costa, M. C., Rocha, W., Feldpausch, T. R., Mendoza, A. L. M., da Costa, A. C. L., Meir, P., Phillips, O. L., & Malhi, Y. (2015). Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia. *Nature*, *519*(7541), 78–82. <https://doi.org/10.1038/nature14213>
- Dusenge, M. E., Duarte, A. G., & Way, D. A. (2019). Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO_2 and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. *New Phytologist*, *221*(1), 32–49. <https://doi.org/10.1111/nph.15283>
- Esteban, E. J. L., Castilho, C. V., Melgaço, K. L., & Costa, F. R. C. (2021). The other side of droughts: wet extremes and topography as buffers of negative drought effects in an Amazonian forest. *New Phytologist*, *229*(4), 1995–2006. <https://doi.org/10.1111/nph.17005>

- Fernández-de-Uña, L., Martínez-Vilalta, J., Poyatos, R., Mencuccini, M., & McDowell, N. G. (2023). The role of height-driven constraints and compensations on tree vulnerability to drought. In *New Phytologist* (Vol. 239, Issue 6, pp. 2083–2098). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/nph.19130>
- Fisher, J. B., Tu, K. P., & Baldocchi, D. D. (2008). Global estimates of the land–atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. *Remote Sensing of Environment*, *112*(3), 901–919. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.025>
- Fontes, C. G., Dawson, T. E., Jardine, K., McDowell, N., Gimenez, B. O., Anderegg, L., Negrón-Juárez, R., Higuchi, N., Fine, P. V. A., Araújo, A. C., & Chambers, J. Q. (2018). Dry and hot: The hydraulic consequences of a climate change–type drought for Amazonian trees. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *373*(1760). <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0209>
- Fu, X., Meinzer, F. C., Woodruff, D. R., Liu, Y. Y., Smith, D. D., McCulloh, K. A., & Howard, A. R. (2019). Coordination and trade-offs between leaf and stem hydraulic traits and stomatal regulation along a spectrum of isohydry to anisohydry. *Plant Cell and Environment*, *42*(7), 2245–2258. <https://doi.org/10.1111/pce.13543>
- Garcia, M. N., Ferreira, M. J., Ivanov, V., dos Santos, V. A. H. F., Ceron, J. V., Guedes, A. V., Saleska, S. R., & Oliveira, R. S. (2021). Importance of hydraulic strategy trade-offs in structuring response of canopy trees to extreme drought in central Amazon. *Oecologia*, *197*(1), 13–24. <https://doi.org/10.1007/s00442-021-04924-9>
- Gauí, T. D., Costa, F. R. C., Coelho de Souza, F., Amaral, M. R. M., de Carvalho, D. C., Reis, F. Q., & Higuchi, N. (2019). Long-term effect of selective logging on floristic composition: A 25 year experiment in the Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*, *440*, 258–266. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.033>
- Goldstein, G., Andrade, J. L., Meinzer, F. C., Holbrook, N. M., Cavelier, J., Jackson, P., & Celis, A. (1998a). Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees. *Plant, Cell and Environment*, *21*(4), 397–406. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1998.00273.x>
- Goldstein, G., Andrade, J. L., Meinzer, F. C., Holbrook, N. M., Cavelier, J., Jackson, P., & Celis, A. (1998b). Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees. *Plant, Cell and Environment*, *21*(4), 397–406. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1998.00273.x>
- Gorgens, E. B., Nunes, M. H., Jackson, T., Coomes, D., Keller, M., Reis, C. R., Valbuena, R., Rosette, J., de Almeida, D. R. A., Gimenez, B., Cantinho, R., Motta, A. Z., Assis, M., de Souza Pereira, F. R., Spanner, G., Higuchi, N., & Ometto, J. P. (2021). Resource availability and disturbance shape maximum tree height across the Amazon. *Global Change Biology*, *27*(1), 177–189. <https://doi.org/10.1111/gcb.15423>
- Hietz, P., Rosner, S., Hietz-Seifert, U., & Wright, S. J. (2017). Wood traits related to size and life history of trees in a Panamanian rainforest. *New Phytologist*, *213*(1), 170–180. <https://doi.org/10.1111/nph.14123>
- Higuchi, N., S Jardim, F. C., dos Santos, J., Pereira Barbosa, A., & Wood, T. W. (1985). *BACIA 3- INVENTÁRIO FLORESTAL COMERCIAL*.
- 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 and Environment*, *43*(4), 965–980. <https://doi.org/10.1111/pce.13687>

- Jasechko, S., Sharp, Z. D., Gibson, J. J., Birks, S. J., Yi, Y., & Fawcett, P. J. (2013). Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature*, *496*(7445), 347–350. <https://doi.org/10.1038/nature11983>
- Jupa, R., Plavcová, L., Gloser, V., & Jansen, S. (2016). Linking xylem water storage with anatomical parameters in five temperate tree species. *Tree Physiology*, *36*(6), 756–769. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpw020>
- Kocher, P., Horna, V., & Leuschner, C. (2013). Stem water storage in five coexisting temperate broad-leaved tree species: significance, temporal dynamics and dependence on tree functional traits. *Tree Physiology*, *33*(8), 817–832. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpt055>
- Köcher, P., Horna, V., & Leuschner, C. (2013). Stem water storage in five coexisting temperate broad-leaved tree species: Significance, temporal dynamics and dependence on tree functional traits. *Tree Physiology*, *33*(8), 817–832. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpt055>
- Kunert, N., Aparecido, L. M. T., Wolff, S., Higuchi, N., Santos, J. dos, Araujo, A. C. de, & Trumbore, S. (2017). A revised hydrological model for the Central Amazon: The importance of emergent canopy trees in the forest water budget. *Agricultural and Forest Meteorology*, *239*, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.03.002>
- Malhi, Y., Baker, T. R., Phillips, O. L., Almeida, S., Alvarez, E., Arroyo, L., Chave, J., Czimczik, C. I., Fiore, A. Di, Higuchi, N., Killeen, T. J., Laurance, S. G., Laurance, W. F., Lewis, S. L., Montoya, L. M. M., Monteagudo, A., Neill, D. A., Vargas, P. N., Patiño, S., ... Lloyd, J. (2004). The above-ground coarse wood productivity of 104 Neotropical forest plots. *Global Change Biology*, *10*(5), 563–591. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00778.x>
- MCCULLOH, K. A., JOHNSON, D. M., MEINZER, F. C., & WOODRUFF, D. R. (2014). The dynamic pipeline: hydraulic capacitance and xylem hydraulic safety in four tall conifer species. *Plant, Cell & Environment*, *37*(5), 1171–1183. <https://doi.org/10.1111/pce.12225>
- McDowell, N. G., Ball, M., Bond-Lamberty, B., Kirwan, M. L., Krauss, K. W., Megonigal, J. P., Mencuccini, M., Ward, N. D., Weintraub, M. N., & Bailey, V. (2022). Processes and mechanisms of coastal woody-plant mortality. *Global Change Biology*, *28*(20), 5881–5900. <https://doi.org/10.1111/gcb.16297>
- Meinzer, F. C., Goldstein, G., & Andrade, J. L. (2001). Regulation of water flux through tropical forest canopy trees: Do universal rules apply? *Tree Physiology*, *21*(1), 19–26. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.1.19>
- Meinzer, F. C., James, S. A., & Goldstein, G. (2004). Dynamics of transpiration, sap flow and use of stored water in tropical forest canopy trees. *Tree Physiology*, *24*, 901–909.
- Meinzer, F. C., James, S. A., Goldstein, G., & Woodruff, D. (2003). Whole-tree water transport scales with sapwood capacitance in tropical forest canopy trees. *Plant, Cell and Environment*, *26*(7), 1147–1155. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01039.x>
- 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*(5), 922–930. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01577.x>
- Meinzer, F. C., Woodruff, D. R., Domec, J. C., Goldstein, G., Campanello, P. I., Gatti, M. G., & Villalobos-Vega, R. (2008a). Coordination of leaf and stem water transport properties in tropical forest trees. *Oecologia*, *156*(1), 31–41. <https://doi.org/10.1007/s00442-008-0974-5>

- Meinzer, F. C., Woodruff, D. R., Domec, J.-C., Goldstein, G., Campanello, P. I., Gatti, M. G., & Villalobos-Vega, R. (2008b). Coordination of leaf and stem water transport properties in tropical forest trees. *Oecologia*, *156*(1), 31–41. <https://doi.org/10.1007/s00442-008-0974-5>
- Mencuccini, M. (2003). The ecological significance of long-distance water transport: Short-term regulation, long-term acclimation and the hydraulic costs of stature across plant life forms. In *Plant, Cell and Environment* (Vol. 26, Issue 1, pp. 163–182). <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.00991.x>
- Meng, L., Chambers, J., Koven, C., Pastorello, G., Gimenez, B., Jardine, K., Tang, Y., McDowell, N., Negron-Juarez, R., Longo, M., Araujo, A., Tomasella, J., Fontes, C., Mohan, M., & Higuchi, N. (2022). Soil moisture thresholds explain a shift from light-limited to water-limited sap velocity in the Central Amazon during the 2015-16 El Niño drought. *Environmental Research Letters*, *17*(6). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6f6d>
- Nadal, M., Flexas, J., & Gulías, J. (2018). Possible link between photosynthesis and leaf modulus of elasticity among vascular plants: a new player in leaf traits relationships? In *Ecology Letters* (Vol. 21, Issue 9, pp. 1372–1379). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/ele.13103>
- Nepstad, D. C., Tohver, I. M., Ray, D., Moutinho, P., & Cardinot, G. (2007). Mortality of Large Trees and Lianas following Experimental Drought in an Amazon Forest. In *Source: Ecology* (Vol. 88, Issue 9).
- Oliva Carrasco, L., Bucci, S. J., Di Francescantonio, D., Lezcano, O. A., Campanello, P. I., Scholz, F. G., Rodriguez, S., Madanes, N., Cristiano, P. M., Hao, G.-Y., Holbrook, N. M., & Goldstein, G. (2015). Water storage dynamics in the main stem of subtropical tree species differing in wood density, growth rate and life history traits. *Tree Physiology*, *35*(4), 354–365. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu087>
- Oliveira, R. S., Eller, C. B., Barros, F. de V., Hirota, M., Brum, M., & Bittencourt, P. (2021a). Linking plant hydraulics and the fast–slow continuum to understand resilience to drought in tropical ecosystems. *New Phytologist*, *230*(3), 904–923. <https://doi.org/10.1111/nph.17266>
- Oliveira, R. S., Eller, C. B., Barros, F. de V., Hirota, M., Brum, M., & Bittencourt, P. (2021b). Linking plant hydraulics and the fast–slow continuum to understand resilience to drought in tropical ecosystems. In *New Phytologist* (Vol. 230, Issue 3, pp. 904–923). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/nph.17266>
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, *333*(6045), 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Phillips, N. G., Scholz, F. G., Bucci, S. J., Goldstein, G., & Meinzer, F. C. (2009). Using branch and basal trunk sap flow measurements to estimate whole-plant water capacitance: comment on Burgess and Dawson (2008). *Plant and Soil*, *315*(1–2), 315–324. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9741-y>
- 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*(2), 481–492. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03092.x>
- Rowland, L., Da Costa, A. C. L., Galbraith, D. R., Oliveira, R. S., Binks, O. J., Oliveira, A. A. R., Pullen, A. M., Doughty, C. E., Metcalfe, D. B., Vasconcelos, S. S., Ferreira, L. V., Malhi, Y., Grace, J.,

- Mencuccini, M., & Meir, P. (2015). Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. *Nature*, 528(7580), 119–122. <https://doi.org/10.1038/nature15539>
- Sack, L., Cowan, P. D., Jaikumar, N., & Holbrook, N. M. (2003). The “hydrology” of leaves: Co-ordination of structure and function in temperate woody species. *Plant, Cell and Environment*, 26(8), 1343–1356. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2003.01058.x>
- Salati, E., & Vose, P. B. (1984). Amazon Basin: A System in Equilibrium. In *New Series* (Vol. 225, Issue 4658).
- Santiago, L. S., De Guzman, M. E., Baraloto, C., Vogenberg, J. E., Brodie, M., Hérault, B., Fortunel, C., & Bonal, D. (2018a). Coordination and trade-offs among hydraulic safety, efficiency and drought avoidance traits in Amazonian rainforest canopy tree species. *New Phytologist*, 218(3), 1015–1024. <https://doi.org/10.1111/nph.15058>
- Santiago, L. S., De Guzman, M. E., Baraloto, C., Vogenberg, J. E., Brodie, M., Hérault, B., Fortunel, C., & Bonal, D. (2018b). Coordination and trade-offs among hydraulic safety, efficiency and drought avoidance traits in Amazonian rainforest canopy tree species. *New Phytologist*, 218(3), 1015–1024. <https://doi.org/10.1111/nph.15058>
- Schlesinger, W. H., & Jasechko, S. (2014). Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189–190, 115–117. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.011>
- Scholander, P. F., Hammel, H. T., Bradstreet, E. D., Hemmingsen, E. A., Miss, D., & Bradstreet, E. D. (n.d.). *Sap Pressure in Vascular Plants Negative hydrostatic pressure can be measured in plants*.
- Scholz, Bucci, S. J. ;, Goldstein, G. ;, Meinzer, F. C. ;, Franco, A. C. ;, & Miralles-Wilhelm, F. (2008). Temporal dynamics of stem expansion and contraction in savanna trees: withdrawal and recharge of stored water. *Tree Physiology*, 28, 469–480.
- SCHOLZ, F. G., BUCCI, S. J., GOLDSTEIN, G., MEINZER, F. C., FRANCO, A. C., & MIRALLES-WILHELM, F. (2007). Biophysical properties and functional significance of stem water storage tissues in Neotropical savanna trees. *Plant, Cell & Environment*, 30(2), 236–248. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01623.x>
- Scholz, F. G., Phillips, N. G., Bucci, S. J., Meinzer, F. C., & Goldstein, G. (2011). *Hydraulic Capacitance: Biophysics and Functional Significance of Internal Water Sources in Relation to Tree Size* (pp. 341–361). https://doi.org/10.1007/978-94-007-1242-3_13
- Spanner, G. C., Gimenez, B. O., Wright, C. L., Menezes, V. S., Newman, B. D., Collins, A. D., Jardine, K. J., Negrón-Juárez, R. I., Lima, A. J. N., Rodrigues, J. R., Chambers, J. Q., Higuchi, N., & Warren, J. M. (2022a). Dry Season Transpiration and Soil Water Dynamics in the Central Amazon. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.825097>
- Stratton, L., Goldstein, G., & Meinzer, F. C. (2000). Stem water storage capacity and efficiency of water transport: their functional significance in a Hawaiian dry forest. *Plant, Cell and Environment*, 23, 99–106.
- 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., Scalon, M. C., Marimon, B. S., Oliveras Menor, I., Marimon, B. H., Fancourt, M., ... Galbraith, D. R. (2023). Basin-wide variation in tree hydraulic safety margins predicts the carbon balance of Amazon forests. *Nature*, 617(7959), 111–117. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05971-3>

Xie, S., Mo, X., Liu, S., & Hu, S. (2023). Plant Hydraulics Improves Predictions of ET and GPP Responses to Drought. *Water Resources Research*, 59(5). <https://doi.org/10.1029/2022WR033402>

Ziemińska, K., Rosa, E., Gleason, S. M., & Holbrook, N. M. (2020). Wood day capacitance is related to water content, wood density, and anatomy across 30 temperate tree species. *Plant Cell and Environment*, 43(12), 3048–3067. <https://doi.org/10.1111/pce.13891>

ANEXO

A)



B)



Figura 1. a) Instalação e b) manutenção de sensores de fluxo de seiva (tipo Granier) em diferentes árvores da amostra utilizada neste estudo.

A)**B)****C)**

Figura 2. a) Ascensão em árvore com técnica de escalada (blocante) para instalação de sensores de fluxo de seiva próximo à copa, b) sensor de fluxo de seiva instalado próximo à copa de uma das árvores monitoradas e c) acesso à copa de uma das árvores com sensores de fluxo de seiva usando o elevador vertical (grua).



Figura 3. Sensores de fluxo de seiva conectados ao datalogger e acondicionados em caixa para armazenamento e proteção do sistema. Além disso, a caixa inclui reguladores de tensão para a energia recebida e distribuída para os sensores. A energia é fornecida por placas solares que ficam a aproximadamente a 200 m do local, na margem de uma estrada que fornecesse acesso a área.



Figura 4. Quatro árvores com sensores de fluxo de seiva instalados na base do caule a aproximadamente 1,30 metros do solo.

A)



B)



Figura 5. Remoção do núcleo do tronco de uma das árvores utilizadas neste estudo, e b) processo de determinação da profundidade do xilema ativo com o método de passagem da luz, utilizando os núcelos de madeira coletados em (a).