



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/04.27.16.38-TDI

**RESPOSTA ECOHIDROLÓGICA DA FLORESTA  
INUNDÁVEL À SECA DE 2015/2016 NA REGIÃO DA  
ILHA DO BANANAL**

Iane Brito Tavares

Tese de Doutorado do Curso  
de Pós-Graduação em Ciência do  
Sistema Terrestre, orientada pela  
Dra. Laura de Simone Borma,  
aprovada em 16 de maio de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3T7KKLP>>

INPE  
São José dos Campos  
2019

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):****Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

**Membros:**

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/04.27.16.38-TDI

**RESPOSTA ECOHIDROLÓGICA DA FLORESTA  
INUNDÁVEL À SECA DE 2015/2016 NA REGIÃO DA  
ILHA DO BANANAL**

Iane Brito Tavares

Tese de Doutorado do Curso  
de Pós-Graduação em Ciência do  
Sistema Terrestre, orientada pela  
Dra. Laura de Simone Borma,  
aprovada em 16 de maio de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3T7KKLP>>

INPE  
São José dos Campos  
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Tavares, Iane Brito.

T197r Resposta ecohidrológica da floresta inundável à seca de 2015/2016 na região da Ilha do Bananal / Iane Brito Tavares. – São José dos Campos : INPE, 2019.  
xxiv + 123 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/04.27.16.38-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.  
Orientadora : Dra. Laura de Simone Borma.

1. Planície de inundação. 2. Áreas úmidas. 3. Seca.  
4. Crescimento da vegetação. 5. Hidrologia. I.Título.

CDU 551.435.12(811.7)

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): *Iane Brito Tavares*

Título: "RESPOSTA ECOHIDROLÓGICA DA FLORESTA INUNDÁVEL À SECA DE 2015/2016 NA REGIÃO DA ILHA DO BANANAL"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de *Doutor(a)* em *Ciência do Sistema Terrestre*

Dr. Celso von Randow

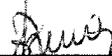


Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dra. Laura de Simone Borma



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dra. Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo

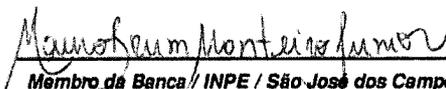


Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Mauro Brum Monteiro Junior

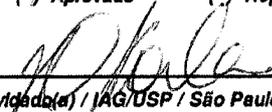


Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Humberto Ribeiro da Rocha

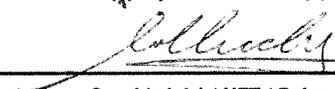


Convidado(a) / IAG/USP / São Paulo - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Erich Collicchio



Convidado(a) / UFT / Palmas - TO

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 16 de maio de 2019



*“Mas os que esperam no Senhor renovarão as suas forças e subirão com asas como águias; correrão e não se cansarão; caminharão e não se fadigarão”.*

ISAÍAS 40:31  
em *Bíblia* - versão Almeida revista e corrigida.



*Dedico este trabalho:*

*A Deus, que criou o Sistema Terrestre para funcionar tão simples, e tão complicado ao mesmo tempo. Elucidar esse funcionamento é o que move a minha curiosidade ativa. A meus pais **Manoel** e **Teresinha**, meus irmãos, **Inara** e **Iron**, e a toda família, em especial minhas tias **Márcia** e **Mauricélia**. Vocês me encorajaram a caminhar por lugares pouco percorridos, a questionar realidades e a construir um mundo de possibilidades. O apoio de vocês nesta caminhada trouxe a certeza que eu não estava sozinha.*



## AGRADECIMENTOS

Realizar este trabalho foi possível graças a ajuda de muitas pessoas, seja por conhecimentos compartilhados, tempo dedicado, ou simplesmente pelas palavras de incentivo. Sou muito grata a todos vocês. Mesmo assim, utilizarei este espaço para destacar algumas pessoas/ou instituições que tiveram um papel central tanto na minha formação acadêmica, quanto no desenvolvimento desta tese.

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais por cumprir a missão de produzir ciência e tecnologia, e oferecer produtos e serviços singulares para a população brasileira, como os programas de pós-graduação, ofertando ensino de excelência, capaz de gerar conhecimentos interdisciplinares para o desenvolvimento nacional e para redução dos impactos ambientais sobre o sistema terrestre.

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Pará por zelar pela política de qualificação profissional, pois por meio desse instrumento recebi incentivo e suporte financeiro para participar deste programa de pós-graduação. Agradeço ao professor M.Sc. Vitor Barbosa, diretor geral do *Campus* Conceição do Araguaia, onde trabalho, pelo apoio e cuidados dedicados durante todo o período de realização deste curso.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP pelo financiamento desta pesquisa (processo n°2013/50531-2), tornando possível o desenvolvimento desta tese.

Ao programa LBA/Palmas-TO (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera da Amazônia) em parceria com a Fundação Universidade do Tocantins por disponibilizar toda estrutura do sítio experimental do Javaésinho, pelo apoio logístico e institucional para execução dos trabalhos de campo.

À professora Dra. Laura De Simone Borma por seus ensinamentos, tempo, paciência, confiança e amizade construída ao longo deste curso. Saiba que esse conjunto tornou possível a finalização desta etapa. Sou muito grata! A senhora me inspira a ser uma grande pesquisadora. Espero, humildemente, ser capaz de inspirar outras pessoas também.

A todos os professores, os coordenadores e as secretárias do Programa de Pós-graduação em Ciência do Sistema Terrestre (PG-CST), pelas instruções e acompanhamento durante cada etapa de realização deste curso, desde comunicados lembrando de períodos de matrículas, até a companhia de vocês minutos antes da minha

defesa de qualificação enquanto os membros da banca chegavam na sala. São atitudes tão simples, mas que fazem diferença na vida de quem as recebem. Muito obrigada.

Aos meus amigos da turma 2014/PG-CST, Anahi Chimini, Raquel Carvalho, Raquel Melo, Marcos Sanches, Diego Jatobá, Eduardo Weide, Márcio Malafaia, e Philipp Edson, e demais colegas do programa, pessoas com quem amo partilhar as tensões do curso saboreando o café do INPE.

Agradeço de coração aos meus girassóis, amigos que ajudaram (direta e indiretamente) na logística e execuções dos trabalhos de campo, ou interpretação do dados obtidos: Anatólio Batista, Deufran Macedo (*in memoriam*), Letícia d'Agosto, Silvia Polizel, Erich Collicchio, Rennan Paloschi, Ranieli Souza, Ricardo Dal'Agnol, Duarte Costa e Fernanda Vasconcellos. Eu sou muito grata a todos! ;)

## RESUMO

As áreas úmidas são amplamente reconhecidas pelos serviços ecossistêmicos que fornecem, desempenhando papel importante nos serviços de regulação hídrica. Existem extensas áreas sazonalmente alagáveis na região amazônica, que operam como um eficiente sistema de retenção de água, controlando e atenuando a altura dos eventos de inundação, retendo nutrientes e o fluxo de sedimentos para os rios. Nessas florestas a composição da comunidade arbórea é determinada principalmente pelas adaptações ao alagamento. No entanto, em um cenário de mudanças no regime de precipitações, o crescimento das árvores e as suas respectivas capacidades de resposta às alterações ambientais naturais, podem ser afetadas. Para entender a resposta da floresta a esses eventos, este trabalho investigou a influência das inundações sazonais no crescimento das árvores em uma área de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado (planície de inundação do rio Araguaia). Avaliou-se como esse padrão de inundação modificou-se no ano de El Niño – Oscilação Sul (ENSO), e seu efeito no crescimento das árvores. Neste trabalho avaliou-se a relação entre as variáveis atmosféricas e hidrológicas (ou seja, precipitação, temperatura do ar, nível do lençol freático e altura inundada) com o crescimento do diâmetro das árvores entre 2004 e 2017. No mesmo período, realizou-se análises físico-químicas do solo, sendo estimada a disponibilidade de água no solo e comparadas com os limites de operações hidráulicas das árvores (potencial hídrico foliar e ponto de perda de turgor foliar). Os resultados mostraram ocorrência de seca nos anos hidrológicos 2015/2016 e 2016/2017 em relação a climatologia da região. Em 2015/2016 observou-se um longo período de estiagem (com duração de 6 meses; precipitação menor que 50 mm), e diminuição na altura e duração do alagamento. O padrão de crescimento do tronco das árvores mostrou redução do incremento no período seco e dormência (5 meses) e no período alagado na floresta sazonalmente alagável na planície do rio Araguaia. O impacto do aumento da duração da fase seca aparentemente foi maior que do período de dormência do período alagado e suficiente para diminuir a tendência geral de crescimento. Em 2015/2016 o crescimento anual atingiu cerca de 50% do valor obtido nos anos climatologicamente normais (2013/2014 e 2014/2015). Parte desse comportamento foi explicado pela falta de água no solo (até 80 cm de profundidade) em alguns meses do período seco. Nesse período os potenciais hídricos no solo estavam abaixo (muito negativos) do limite de operação das árvores avaliadas. Para lidar com o estresse hídrico na seca (ENSO), algumas árvores provavelmente aumentaram o controle estomático para manter o turgor foliar elevado. Observou-se também que em geral, a resposta dessa floresta aos efeitos do alagamento e da seca foi diferente do padrão observado nas florestas sazonalmente alagáveis da Amazônia Central, o que torna difícil generalizar e estabelecer cenários mais conclusivos sobre os impactos das secas extremas no funcionamento das florestas alagáveis. Considerando as previsões de aumento das frequências e severidade das secas na região

Amazônica, investigações sobre as respostas das árvores aos efeitos das secas não devem ser negligenciados.

Palavras-chave: Planície de inundação. Áreas úmidas. Seca. Crescimento da vegetação. Hidrologia.

# ECOHYDROLOGICAL RESPONSE OF THE FLOODPLAIN FOREST TO THE 2015/2016 DROUGHT IN THE BANANAL ISLAND REGION

## ABSTRACT

Wetlands are widely recognized for the ecosystem services they provide, playing an important role in water regulation services. There are extensive seasonally floodable areas in the Amazon region which operate as an efficient water retention system, controlling and attenuating the flood height, retaining nutrients and the flow of sediments to rivers. In these forests, tree community composition is determined mainly by the adaptations to flood. However, in a scenario of changes in the precipitation regime, tree growth and their ability to respond to natural environmental changes may be affected. To understand the response of the forest to these events, this work investigated the influence of seasonal flooding on tree growth in a transition area between the Amazon and Cerrado biomes (Araguaia river floodplain). It was evaluated how this flood pattern changed during an El Niño - Southern Oscillation (ENSO) year, and its effect on tree growth. In this work, the relationship between atmospheric and hydrological variables (i.e., precipitation, air temperature, groundwater level and flooded height) were evaluated with the tree diameter growth between 2004 and 2017. In the same period, physical and chemical soil analyzes were performed along with soil water availability and compared to the trees hydraulic operations limits (leaf water potential and leaf turgor loss point). The results showed the drought occurrence in the hydrological years 2015/2016 and 2016/2017 with reference to the mean climatology of this region. In 2015/2016 a long period of drought presenting rainfall less than 50 mm (lasting 6 months), and decreased height and duration of flooding were observed. The growth trunk pattern of the trees showed a reduction of the increment during the dry period and an extended dormancy (5 months) in the flooded period in the seasonally flooded forest in the Araguaia river plain. The impact of the increased dry phase appeared to be greater than the dormancy during the flooded period, which was sufficient to decrease the overall growth trend. In 2015/2016 the annual growth reached about 50% of the value obtained in climatologically normal years (2013/2014 and 2014/2015). Part of this behavior was explained by the lack of water in the soil (layers up to 80 cm depth) in some months of the dry period. During this period, the soil water potential was below (very negative) the operating limit of the evaluated trees. To cope with water stress during the ENSO drought, some trees probably increased stomatal control to keep leaf turgor high. It was also observed that, in general, the response of this forest to flood and drought effects was different from the pattern observed in the seasonally flooded forests of Central Amazonia, which makes it difficult to generalize and establish more conclusive scenarios on the impacts of extreme droughts on the functioning of floodplain forests. Considering the predictions of increased frequency and severity of droughts in the Amazon region, researches regarding tree responses to the effects of drought should not be neglected.

Keywords: Flood plains. Wetlands. Drought. Vegetation growth. Hydrology.



## LISTA DE FIGURAS

|   | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 1.1 Esquema do balanço hídrico e energético terrestre para uma determinada superfície. a) Balanço de água; b) Balanço de energia . . . . .  | 5           |
| 1.2 Ilustração das zonas saturada e não saturada do solo . . . . .  | 10          |
| 1.3 Curvas de retenção de umidade no solo arenoso e argiloso ajustadas por van Genuchten (1980) . . . . .   | 12          |
| 1.4 Gradiente de transpiração representado pela diferença entre o potencial total de água no solo, raiz, folha e atmosfera . . . . .  | 14          |
| 1.5 Principais eventos que ocorrem na rizosfera durante o alagamento e as modificações metabólicas e fisiológicas resultantes . . . . .   | 16          |
| 1.6 Modelo conceitual da curva pressão-volume. . . . .  | 21          |
| 1.7 Localização do sítio JAV, Parque Estadual do Cantão, Tocantins. . . . .   | 29          |
| 1.8 Variáveis hidroclimáticas médias mensais registradas no sítio JAV, para o período de outubro de 2004 a setembro de 2015. a) Precipitação média mensal ( $P_{médias}$ ); b) Evapotranspiração total média mensal estimada ( $ET_{médias}$ ) e saldo de radiação médio mensal ( $Rn_{médias}$ ); c) Temperatura média mensal do ar ( $Ta_{médias}$ ); d) Cota do alagamento registrada na base da torre micrometeorológica; e) Umidade volumétrica média mensal do solo ( $\theta$ ) em cinco profundidades (20 cm, 40 cm, 80 cm, 150 cm, e 293 cm) | 31          |
| 1.9 Desenho esquemático da torre micrometeorológica e equipamentos instalados no entorno . . . . .  | 33          |
| 1.10 Refletômetros do tipo FDR instalados para monitorar a umidade do solo em diferentes profundidades na base da torre micrometeorológica, sítio JAV, Tocantins, Brasil. a) Sondas instaladas no perfil do solo; b) Vista do local após a instalação dos equipamentos . . . . .  | 34          |
| 1.11 Transecto dos poços piezométricos no período alagado e no período seco, sítio JAV, Tocantins, Brasil . . . . .   | 35          |
| 1.12 Parcelas experimentais instaladas no sítio JAV. a) Parcela sazonalmente alagável; b) Parcela não alagável . . . . .  | 35          |
| 1.13 Dendrômetro manual instalados na parcela sazonalmente alagável e na parcela não alagável . . . . .   | 36          |
| 1.14 Modelo de um dendrômetro automático (A) com o respectivo sistema central de coleta de dados (B) instalado no sítio JAV . . . . .   | 37          |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Análise de correlação entre as bases de dados utilizadas para as variáveis precipitação, temperatura média do ar, e déficit de pressão de vapor . . . .   | 44 |
| 2.2 | Precipitação acumulada para cada ano hidrológico (de outubro a setembro), região do sítio JAV, Tocantins, Brasil. . . . .   | 46 |
| 2.3 | Representação ilustrativa das distâncias dos poços piezométricos 1 (PZ1), 2 (PZ2) e 3 (PZ3) e das parcelas experimentais em relação a torre micrometeorológica do sítio JAV . . . . .   | 48 |
| 2.4 | Registro do crescimento do tronco utilizando dendrômetro manual (fita dendrométrica) e um paquímetro digital . . . . .  | 49 |
| 2.5 | Dendrômetro automático instalados no sítio JAV. a) Vista frontal do equipamento na árvore; b) Vista lateral com destaque para o posicionamento dos transdutores de deslocamento na casca (1) e no xilema (2) . . .  | 51 |
| 2.6 | Variáveis climáticas médias mensais no sítio JAV, com base no período de outubro de 2004 a setembro de 2015 (média a longo prazo), e valores observados no período de outubro de 2015 a setembro de 2017. a) Precipitação acumulada mensal obtidas pelo TRMM (barras em cinza e linha sólida preta) e torre JAV (linha sólida vermelha); b) Temperatura média do ar (Ta) medidas pelo INMET (linha sólida com círculos pretos e linha preta sólida) e torre JAV (linha sólida vermelha); c) Déficit de pressão de vapor estimadas pelo ERA5 (linha sólida com símbolos pretos e linha preta sólida) e torre JAV (linha sólida vermelha) . . . . .   | 53 |
| 2.7 | Variáveis hidrológicas médias mensais e umidade do solo registradas no sítio JAV, com base no período de outubro de 2004 a setembro de 2015 (média a longo prazo), e valores observados no período de outubro de 2015 a setembro de 2017. a) Cota de alagamento registrada na base da torre (linha sólida com símbolos pretos), e cota média mensal (linha preta sólida); b) Cota do lençol freático nos piezômetros 1 (linha contínua com quadrado marrom; PZ1), 2 (linha sólida com quadrado preto; PZ2) e 3 (linha sólida com quadrado azul; PZ3), com os respectivos níveis dos terrenos de cada local (nível PZ1, nível PZ2, e nível PZ1); c) Umidade volumétrica diária mensal do solo nas seguintes profundidades: 20, 80, 150 e 293 cm (descritas como na legenda), com os respectivos valores médios . . . . . | 54 |
| 2.8 | Níveis topográficos da parcela sazonalmente alagável e da parcela não alagável (imagem Base Map ArcGis) . . . . .   | 57 |
| 2.9 | Perfil topográfico da parcela sazonalmente alagável e da parcela não alagável . . . . .   | 57 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.10 | Valores médios de incrementos acumulado do diâmetro do tronco, com os respectivos desvios padrões, nas parcelas sazonalmente alagável (Alag; n=84) e não alagável (N-alag; n=84) monitoradas com dendrômetros manuais. . . . .  | 61 |
| 2.11 | Valores médios de incrementos em diâmetro do tronco com os respectivos desvios padrões, no entorno da torre micrometeorológica, área sazonalmente alagável (Alag; n=5) e não alagável (N-alag; n=2) monitoradas com dendrômetros automáticos. . . . .   | 62 |
| 2.12 | Incremento acumulado do diâmetro do tronco na parcela sazonalmente alagável (Alag) e parcela não alagável (N-alag) com os respectivos desvios padrões, agrupadas segundo a classe de DAP . . . . .  | 63 |
| 2.13 | Matriz de correlação entre as variáveis climáticas (precipitação, temperatura média do ar, e VPD) e o incremento do tronco observado na parcela sazonalmente alagável (Alag) e parcela não alagável (N-alag) . . . . .  | 68 |
| 3.1  | Representação dos perfis amostrados (parcela não alagável, base da torre micrometeorológica, e parcela sazonalmente alagável) e respectivas classes texturais, utilizando a base da torre como nível zero. . . . .  | 81 |
| 3.2  | Valores médios de precipitação acumulada (P), umidade volumétrica diária do solo e potenciais hídricos diários em diferentes profundidades do solo (20, 40, 80 e 150 cm), calculados para o período de outubro de 2004 a setembro de 2015 (média a longo prazo) . . . . .   | 89 |
| 3.3  | Precipitação acumulada mensal (P), umidade volumétrica diária do solo e potenciais hídricos diários em diferentes profundidades do solo (20, 40, 80 e 150 cm) para o período observado (novembro de 2015 a outubro de 2016) . . . . .   | 90 |
| 3.4  | Potencial hídrico foliar mínimo ( $\Psi_{\text{foliar mín}}$ ) das árvores avaliadas no início e final do período seco do ano hidrológico 2015/16 . . . . .   | 94 |
| 3.5  | Valores médio de ponto de perda de turgor ( $\Psi_{\text{tlp}}$ ), potenciais hídricos foliares mínimo e máximo ( $\Psi_{\text{foliar mín}}$ e $\Psi_{\text{foliar máx}}$ , respectivamente) das árvores avaliadas na parcela sazonalmente alagável (parcela Alag), e potenciais hídricos no solo nas profundidades 20 cm, 80 cm e 150 cm. a) Início e; b) Final do período seco sazonal. . . . . | 95 |
| 3.6  | Umidades diárias médias em três profundidades do solo (20 cm, 80 cm, e 150 cm) registradas nos três primeiros anos do mês de setembro (2005, 2010 e 2016) que apresentaram os menores valores desde 2005, e comparadas com a média a longo prazo (calculada para o período de outubro/2004 a setembro/2015), sítio JAV. . . . .   | 98 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 3.7 | Medidas de pontos de perda de turgor em diferentes ambientes. . . . . | 99 |
|-----|---|----|

## LISTA DE TABELAS

|  | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 2.1 Dados coletados com as respectivas unidades, período de coleta e base de dados consultado, sítio JAV . . . . .   | 43          |
| 2.2 Parâmetros calculados para a Equação 2.1 . . . . .   | 47          |
| 2.3 Identificação botânica das árvores com dendrômetros manuais situadas na parcela sazonalmente alagável e potenciais ambientes de ocorrência . .   | 58          |
| 2.4 Identificação botânica das árvores com dendrômetros manuais situadas na parcela não alagável e potenciais ambientes de ocorrência . . . . .  | 59          |
| 2.5 Padrões de crescimento do tronco, com as respectivas probabilidades de significância (p), observados nos períodos chuvoso não-alagado, alagado e seco de 2015/15 e 2016/17 . . . . .   | 65          |
| 2.6 Valores médios dos incrementos acumulados do diâmetro do tronco nos anos hidrológicos secos 2015/16, 2016/17 e anos não atípicos em parcela sazonalmente alagável (Alag) e parcela não alagável (N-alag) . . . . .   | 66          |
| 3.1 Classificação textural dos solos das parcelas sazonalmente alagável (Alag) e não alagável (N-Alag), sítio JAV, Tocantins, Brasil. Legenda: Class. USDA = classe textural segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos ( <i>United States Department of Agriculture - USDA</i> ). . . . . | 80          |
| 3.2 Propriedades físicas - textura, porosidade e densidade do perfil de solo na base da torre, sítio JAV, Tocantins, Brasil. Legenda: Class. USDA = classe textural segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos ( <i>United States Department of Agriculture - USDA</i> ). . . . .          | 80          |
| 3.3 Caracterização química dos solos na base da torre, sítio JAV. . . . .  | 82          |
| 3.4 Caracterização química dos solos nas parcelas sazonalmente alagável e não alagável. . . . .  | 82          |
| 3.5 Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de umidade pela equação de van Genuchten. . . . .  | 87          |
| 3.6 Ponto de perda de turgor ( $\Psi_{tlp}$ ), potencial hídrico foliar diário máximo ( $\Psi_{foliar\ máx}$ ) e mínimo ( $\Psi_{foliar\ mín}$ ) no início e final do período seco do ano hidrológico 2015/16, nos ambientes sazonalmente alagável (Alag) e não alagável (N-Alag), sítio JAV. . . . .    | 92          |



## SUMÁRIO

|   | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .   | <b>1</b>    |
| 1.1 Objetivos . . . . .   | 4           |
| 1.1.1 Objetivo geral . . . . .  | 4           |
| 1.1.1.1 Objetivos específicos . . . . .   | 4           |
| 1.2 Referencial teórico . . . . .   | 4           |
| 1.2.1 Interação solo-planta-atmosfera: visão geral . . . . .  | 4           |
| 1.2.1.1 Suprimento e demanda de água pela atmosfera . . . . .   | 5           |
| 1.2.1.2 Habilidade do solo em armazenar e reter água . . . . .  | 8           |
| 1.2.1.3 Influência da vegetação no fluxo de água . . . . .  | 12          |
| 1.2.2 Florestas sazonalmente alagáveis na região amazônica . . . . .  | 23          |
| 1.2.2.1 Efeito dos eventos extremos de seca e inundação em áreas alagáveis . . . . .  | 26          |
| 1.3 Área de estudo: sítio experimental do Javaésinho . . . . .  | 29          |
| 1.3.1 Equipamentos instalados no sítio JAV . . . . .  | 32          |
| 1.3.1.1 Torre micrometeorológica . . . . .  | 32          |
| 1.3.1.2 Monitoramento da umidade volumétrica do solo . . . . .  | 33          |
| 1.3.1.3 Monitoramento da cota de alagamento e nível da água subterrânea . . . . .   | 34          |
| 1.3.1.4 Parcelas experimentais e monitoramento do crescimento radial do tronco . . . . .  | 35          |
| <br>  |             |
| <b>2 PADRÃO DE CRESCIMENTO DO TRONCO DAS ÁRVORES LOCALIZADAS EM UMA FLORESTA SAZONALMENTE ALAGÁVEL DURANTE ANOS SECOS</b> . . . . . | <b>39</b>   |
| 2.1 Introdução . . . . .  | 39          |
| 2.2 Material e métodos . . . . .  | 41          |
| 2.2.1 Sítio experimental . . . . .  | 41          |
| 2.2.2 Coleta de dados e estratégia experimental . . . . .   | 42          |
| 2.2.2.1 Dados hidroclimáticos . . . . .   | 45          |
| 2.2.2.2 Levantamento planialtimétrico . . . . .   | 48          |
| 2.2.2.3 Seleção das árvores e medidas do crescimento do tronco . . . . .  | 49          |
| 2.2.3 Análise dos dados . . . . .   | 51          |
| 2.3 Resultados . . . . .  | 52          |
| 2.3.1 Condições hidroclimáticas médias e ambientais . . . . .   | 52          |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 2.3.2   | Condições hidroclimáticas nos anos secos . . . . .  | 55        |
| 2.3.3   | Levantamento topográfico . . . . .  | 56        |
| 2.3.4   | Identificação botânica das espécies com dendrômetros manuais . . . . .  | 58        |
| 2.3.5   | Crescimento do tronco em áreas sazonalmente alagáveis . . . . .   | 60        |
| 2.3.5.1   | Padrão de crescimento . . . . .   | 60        |
| 2.3.5.2   | Crescimento do tronco em função do DAP . . . . .  | 63        |
| 2.3.5.3   | Crescimento acumulado anual . . . . .   | 66        |
| 2.3.5.4   | Crescimento do tronco e condicionantes climáticos . . . . .   | 67        |
| 2.4   | Discussões . . . . .  | 69        |
| 2.4.1   | Padrão de crescimento do tronco em florestas sazonalmente alagáveis e não alagáveis . . . . .                                 | 69        |
| 2.4.2   | Como uma seca severa de um ano seco (ENSO) influencia no crescimento do tronco de florestas sazonalmente alagáveis? . . . . . | 71        |
| 2.5   | Conclusão . . . . .   | 72        |
| <br><b>3 CONDIÇÕES HÍDRICAS NO SOLO E EM ÁRVORES DE EM UMA ÁREA SAZONALMENTE ALAGÁVEL . . . . .</b> |   | <b>75</b> |
| 3.1   | Introdução . . . . .  | 75        |
| 3.2   | Materiais e Métodos . . . . .   | 77        |
| 3.2.1   | Local de estudo . . . . .   | 77        |
| 3.2.2   | Coleta de amostras e estratégia experimental . . . . .  | 78        |
| 3.2.2.1   | Dados de precipitação e umidade do solo . . . . .   | 78        |
| 3.2.2.2   | Coleta de solos . . . . .   | 79        |
| 3.2.3   | Ensaio de sucção dos solos . . . . .  | 83        |
| 3.2.4   | Medidas de potencial hídrico foliar no período seco sazonal e ponto de perda de turgor . . . . .                              | 84        |
| 3.2.5   | Análise dos dados . . . . .   | 85        |
| 3.2.5.1   | Precipitação, umidade do solo e potencial hídrico . . . . .   | 85        |
| 3.2.5.2   | Planta . . . . .  | 86        |
| 3.3   | Resultados . . . . .  | 86        |
| 3.3.1   | Capacidade de retenção e armazenamento de água . . . . .  | 86        |
| 3.3.2   | Potenciais hídricos no solo . . . . .   | 87        |
| 3.3.3   | Potenciais hídricos foliares . . . . .  | 91        |
| 3.3.3.1   | Ponto de perda de turgor e potenciais hídricos nas árvores . . . . .  | 91        |
| 3.3.4   | Ambiente sazonalmente alagável: potencial hídrico no solo e nas plantas . . . . .   | 94        |
| 3.4   | Discussões . . . . .  | 96        |
| 3.4.1   | Características dos solos e capacidade de armazenamento e retenção de água . . . . .  | 96        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 3.4.2    | Disponibilidade de água nos solos durante a seca sazonal e extrema . . . | 97         |
| 3.4.3    | Resistência a seca e estratégias para lidar com a estiagem . . . . .     | 99         |
| 3.5      | Conclusão . . . . .  | 102        |
| <b>4</b> | <b>CONCLUSÕES . . . . .</b>  | <b>103</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>                              | <b>105</b> |



# 1 INTRODUÇÃO

As áreas úmidas estão entre os ecossistemas mais ameaçados do mundo, apesar dos vários esforços internacionais direcionados à sua proteção ([MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005](#)). Entre as principais ameaças incluem: lançamento de águas residuárias não tratadas, resíduos industriais, escoamento agrícola, erosão e alterações nos sedimentos ([WETLANDS, 2018](#)). Segundo os mesmos autores, aproximadamente 35% das áreas úmidas do mundo foram perdidas entre 1970 e 2015, com taxas anuais de perda acelerando a partir de 2000.

Estes ambientes são bastante produtivos e valorizados mundialmente porque oferecem inúmeros benefícios econômicos, sociais e ambientais - reconhecidos como serviços ecossistêmicos ([COSTANZA et al., 1997](#)). Entre os serviços ecossistêmicos das áreas úmidas destacam-se a capacidade de regular processos ecológicos essenciais e sistemas de suporte à vida (e.g., regulação do clima e do ciclo hidrológico), prevenção de enchentes, fornecimento de alimentos e insumos, entre outros ([MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005](#); [MITSCH; GOSSELINK, 2015](#)).

As áreas úmidas cobertas por florestas situadas às margens dos grandes rios, como o Amazonas e o Araguaia, são conhecidas como florestas sazonalmente alagáveis ([JUNK et al., 2011](#); [PIECADE et al., 2015](#)). A composição das comunidades vegetais dessas florestas é principalmente determinada pela necessidade de adaptação à fase alagada, também chamada de fase aquática ([PAROLIN, 2001](#); [PAROLIN, 2010](#)). No entanto, sob um cenário de mudanças no regime hidrológico e alteração na frequência e intensidade de eventos extremos de seca e cheia, a composição, a estrutura e o crescimento dessas florestas podem ser severamente afetados ([INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE-IPCC, 2014](#); [JUNK et al., 2013](#); [NEPSTAD et al., 2002](#); [PIECADE et al., 2013](#)).

A resposta das áreas de terra-firme da floresta amazônica aos extremos de seca tem sido matéria de grande debate na comunidade científica nacional e internacional [ e.g. [Bi et al. \(2015\)](#), [Huete et al. \(2006\)](#), [Nepstad et al. \(2007\)](#), [Phillips et al. \(2009\)](#), [Saatchi et al. \(2013\)](#), [Saleska et al. \(2007\)](#), [Williamson et al. \(2000\)](#) e outros]. Resultados de pesquisas *in situ* apontaram para mortalidade das florestas de terra-firme na ocorrência de seca sazonal, interanual ou induzida ([NEPSTAD et al., 2007](#); [PHILLIPS et al., 2009](#); [SAATCHI et al., 2013](#); [WILLIAMSON et al., 2000](#)), enquanto outras, baseadas em dados de sensores remotos, indicaram crescimento de novas folhas e incremento na atividade fotossintética em algumas regiões da Bacia Amazônica ([BI et al., 2015](#); [HUETE et al., 2006](#); [SALESKA et al., 2007](#)).

É consenso entre os trabalhos realizados no território Amazônico que ambientes diferentes tendem a responder de maneira distinta às secas sazonais e extremas. Nas florestas de terra-firme, essas diferenças foram atribuídas a: i) diferenças na radiação solar incidente [e.g. Rocha et al. (2009)]; ii) diferenças na disponibilidade de água no solo para atender às demandas atmosféricas [e.g. Christoffersen et al. (2014), Restrepo-Coupe et al. (2013), Rocha et al. (2009)]; iii) capacidade de captar água das camadas mais úmidas e mais profundas do solo (BRUNO et al., 2006; NEPSTAD et al., 2007; ROCHA et al., 2004) e; iv) diferenças na capacidade/estratégias (traços funcionais) das plantas de lidar com a seca (BARROS, 2017). Tem sido sugerido que ambientes submetidos a secas prolongadas sazonais, como por exemplo, as regiões a leste e sudeste da Amazônia, tenderiam, em princípio, a apresentar melhor adaptação as secas extremas, em comparação com ambientes menos sazonais (BARROS, 2017; BRUM JUNIOR, 2013).

Por outro lado, no caso das florestas sazonalmente alagáveis, estudos observacionais sugerem que esses ambientes sofrem mais com os alagamentos sazonais ou extremos, do que com as secas anômalas (PIEPADE et al., 2013). Essa resposta foi atribuída à redução do período de alagamento (fase aquática) (MARENGO et al., 2011; SCHÖNGART et al., 2004) e consequente atenuação das condições limitantes ao crescimento e desenvolvimento das plantas (WORBES, 1997), associado ao prolongamento do período vegetativo, normalmente restrito à fase terrestre (SCHÖNGART et al., 2002; WORBES, 1997).

Florestas sazonalmente alagadas podem ser definidas como áreas periodicamente inundadas pelo transbordamento lateral de rios ou lagos e/ou pela precipitação direta ou águas subterrâneas, o que resulta em um ambiente físico-químico peculiar, que leva a biota a responder por meio de adaptações morfológicas, anatômica ou fisiológicas (JUNK et al., 1989).

Diferentemente do que ocorre nas florestas sazonalmente alagável dos rios Solimões/Amazonas, na floresta sazonalmente alagável do rio Araguaia, as pesquisas vem demonstrando dois períodos de potencial estresse hídrico para as plantas (comportamento bimodal) - no alagamento e no auge do período seco (BORMA et al., 2009; COSTA, 2015; HOMEIER et al., 2017; KURZATKOWSKI et al., 2015; ROCHA et al., 2009). No caso da seca, como os solos da região são compostos por uma camada de argila pouco espessa situada sobre uma camada arenosa (BORMA et al., 2009), a água retida no período chuvoso é rapidamente drenada, podendo intensificar o estresse hídrico para as plantas. Além disso, nessa região, o período seco é prolongado (cerca

de 5 meses), nos quais o volume de chuvas é menor que 50 mm (MARCUIZZO; GOU-LARTE, 2013). Todos esses fatores atuam no sentido de diminuir a disponibilidade de água no solo da fase terrestre (BORMA et al., 2009), eventualmente resultando no comportamento bimodal de redução na produtividade desse ecossistema, aumento na produção de serrapilheira (COSTA, 2015; MOREIRA et al., 2005), e provavelmente na diminuição do crescimento florestal.

A ecohidrologia e ecofisiologia das florestas sazonalmente alagáveis apresentam complexidades e particularidades que precisam ser melhores entendidas, para que os processos que controlam o crescimento das árvores sejam compreendidos. Por isso, duas perguntas resumem os esforços que orientam este estudo: 1) **Como o crescimento da vegetação de uma área sazonalmente alagável responde às fases terrestre e aquática?** e **Como eventos de seca influenciaram no crescimento das árvores desse ambiente?**

Para responder a essas perguntas, analisamos dados de crescimento das plantas na área sazonalmente alagável do rio Araguaia, em associação com dados de clima, solo e variação do lençol freático. A pesquisa foi realizada no período de 2015 a 2017, abrangendo dois anos hidrológicos 2015/16 e 2016/17, sendo que o primeiro deles corresponde à forte seca de 2015/16 (ENSO) (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016).

Baseados em trabalhos realizados na região de estudo (BORMA et al., 2009; COSTA, 2015; FONSECA et al., 2019; KURZATKOWSKI et al., 2015; HOMEIER et al., 2017; ROCHA et al., 2009), supomos que o crescimento das árvores será reduzido nos períodos alagado e seco; e que a disponibilidade de água no período seco será um dos fatores limitantes para o crescimento das árvores.

O conteúdo desta tese encontra-se dividido em quatro capítulos. O primeiro corresponde à introdução e descreve, de forma sucinta, os seguintes tópicos: tema, problema, perguntas científicas, hipóteses, e referencial teórico. O segundo capítulo investiga o padrão de crescimento das árvores nos anos secos, destacando o ano de ENSO 2015-2016. O terceiro capítulo aborda as condições físico-químicas dos solos na área de estudo, a disponibilidade de água média e no ano de ENSO e, os limites de tolerância hídrica das árvores associadas com a disponibilidade de água no solo. Nos resultados foram comparados com outros trabalhos realizados no local, e com outras áreas sazonalmente alagáveis no Brasil. Por fim, o capítulo quatro, conclusões, confronta os resultados obtidos com as hipóteses levantadas previamente.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Estudar o efeito da inundação sazonal sobre o crescimento de uma floresta, situada na planície de alagamento do rio Araguaia, visando melhorar a compreensão dos processos ecohidrológicos que operam na região.

#### 1.1.1.1 Objetivos específicos

- Investigar o padrão de crescimento sazonal das árvores em anos climatologicamente normais e em ano de seca extrema;
- Estudar os efeitos das condições hidroclimáticas sobre o crescimento do tronco das árvores situadas em área sazonalmente alagável;
- Comparar a faixa de variação dos valores de potencial hídrico do solo e plantas (potencial hídrico foliar e ponto de perda de turgor foliar) dos ambientes sazonalmente alagável e não alagável.

## 1.2 Referencial teórico

Esta seção apresenta uma revisão das interações que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera por meio dos fluxos de água e de energia que ocorrem entre uma superfície florestada e a atmosfera. Em seguida, aborda algumas influências da vegetação nesse sistema e aspectos ecofisiológicos quando o solo se encontra saturado, baseado em trabalhos realizados em florestas sazonalmente alagáveis da Amazônia Central e em uma área de transição entre os biomas Amazônia e o Cerrado, destacando algumas respostas dessas florestas aos efeitos dos eventos extremos de seca.

### 1.2.1 Interação solo-planta-atmosfera: visão geral

O fluxo de água entre a superfície coberta por vegetação e a atmosfera é um processo complexo dominado por três fatores principais: oferta de água pela precipitação e a “demanda evaporativa” (isto é, taxa de evaporação controlada predominantemente pela temperatura e umidade do ar), habilidade do solo em reter e armazenar água, e resistência da vegetação à perda de água (transpiração). Esses fatores não atuam como variáveis independentes, mas como um sistema fortemente acoplado (WILSON et al., 1994).

O primeiro deles - oferta de água e demanda evaporativa - é determinado pelas con-

dições atmosféricas, tais como precipitação, saldo de radiação, velocidade do vento, umidade e temperatura do ar. O segundo - habilidade do solo em armazenar e reter água - é uma função das propriedades físicas do solo, em especial, da permeabilidade e porosidade. O último fator está relacionado à resistência da vegetação à perda de água para atmosfera, e depende de fatores como, gradiente de potencial de água (solo-atmosfera), oferta de água no solo, capacidade do sistema radicular acessar água, resistência da planta à seca, e outros.

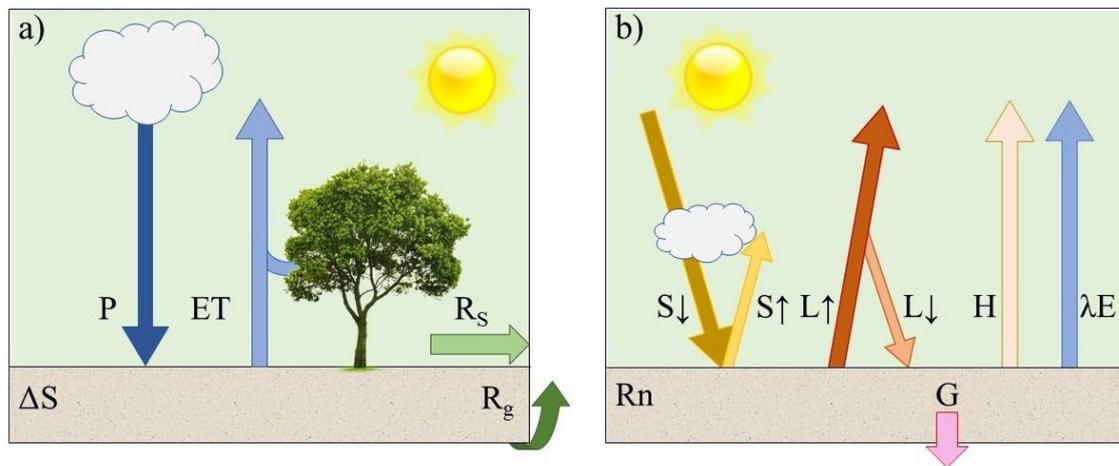
A seguir, apresenta-se uma breve descrição destes fatores.

### 1.2.1.1 Suprimento e demanda de água pela atmosfera

#### Balanco de água e de energia na superfície terrestre

O termo “balanço” representa a relação entre a entrada e a saída de elementos de um sistema e a variação da quantidade resultante desse elemento no interior do sistema. O suprimento e a demanda de água pela atmosfera podem ser entendidos com base nos conceitos de balanço de água e de energia na superfície terrestre apresentados, respectivamente, nas Figuras 1.1a e b.

Figura 1.1 - Esquema do balanço hídrico e energético terrestre para uma determinada superfície. a) Balanço de água; b) Balanço de energia



Todos os componentes desta figura estão identificados nas equações 1.1, 1.2 e 1.3. Fonte: Adaptado de Seneviratne et al. (2010).

O balanço de água é uma descrição matemática dos processos hidrológicos que ope-

ram dentro de uma determinada camada de solo durante um período de tempo. Do ponto de vista hidrológico, o solo pode ser entendido como um reservatório de água, cujo volume varia com o tempo em função de diversos fatores. O balanço de água em uma camada de solo coberta por vegetação (Figura 1.1a), sem considerar as trocas laterais entre as camadas de solo adjacentes, pode ser expresso como (DINGMAN, 2002; SENEVIRATNE et al., 2010):

$$\Delta S = P - ET - R_s - R_g \quad (1.1)$$

onde:  $\Delta S$  - corresponde à variação do conteúdo de água no solo,  $P$  - precipitação,  $ET$  - evapotranspiração,  $R_s$  - escoamento superficial e  $R_g$  - drenagem. O termo evapotranspiração  $ET$ , engloba a evaporação da água disponível no solo, nos corpos hídricos, água interceptada pela vegetação, e transpiração pela vegetação.

Na superfície terrestre, a energia necessária para transformar a água líquida em vapor d'água ( $\lambda E$ ) é fornecida principalmente pelo saldo de radiação ( $R_n$ ), como mostra a Figura 1.1b. O saldo de radiação é a variável que representa a principal fonte de energia para os processos biogeofísicos e biogeoquímicos que ocorrem na interface superfície-atmosfera. Este termo corresponde à soma de todos os componentes do balanço de energia na superfície terrestre, dada por:

$$R_n = (S \downarrow - S \uparrow) + (L \downarrow - L \uparrow) \quad (1.2)$$

onde:  $R_n$  - é a radiação líquida,  $S \downarrow$  - representa a radiação de onda curta incidente,  $S \uparrow$  - a radiação de onda curta refletida,  $L \downarrow$  - a radiação de onda longa emitida pela atmosfera, e  $L \uparrow$  - é a radiação de onda longa emitida pela superfície. Essa equação é denominada balanço de energia.

Desconsiderando-se os transportes horizontais de calor, o balanço de energia pode também ser expresso em função dos processos de transformação de  $R_n$  em outras formas de energia que ocorrem quando a radiação líquida atinge a superfície terrestre, tais como calor latente, calor sensível, calor no solo, ar e vegetação:

$$R_n = H + \lambda E + G + S_a + S_b + E_p \quad (1.3)$$

onde:  $H$  - é o fluxo de calor sensível,  $\lambda E$  - o fluxo de calor latente,  $G$  - o fluxo de

calor no solo,  $S_a$  e  $S_b$  - são, respectivamente, a energia armazenada na camada de ar (entre o solo e vegetação) e na biomassa, e  $E_P$  - é a energia consumida no processo de fotossíntese e liberada na respiração e decomposição. O saldo de radiação pode ser particionado em energia para aquecer o ar em contato com a superfície (H), para os processos de evaporação da água do solo e transpiração das plantas ( $\lambda E$ ), para aquecimento do solo (G), além da energia para aquecimento da camada de vegetação, da camada de ar (entre o solo e vegetação) e para realização dos processos de fotossíntese e respiração.

### **Oferta de água: precipitação e infiltração**

O principal suprimento de água no sistema solo-planta-atmosfera ocorre por meio da precipitação e infiltração. Quando ocorre um evento de precipitação sobre uma camada de solo coberta por vegetação, a quantidade de água recebida pode ser fracionada em três partes: uma parte é interceptada e armazenada pela vegetação, evaporando durante ou após o evento; outra parte alcança o solo escoando pelos troncos, após ser interceptada; e a terceira parte, também chamada de precipitação efetiva, incide diretamente sobre o solo.

A água precipitada que não foi retida pela vegetação penetra no solo através da infiltração, posteriormente movimentando-se no interior do solo por meio da percolação ou drenagem profunda. Esses dois processos - infiltração e percolação - estão intimamente ligados, já que a infiltração não pode continuar se não houver percolação da água dentro do solo e vice-versa. A infiltração ocorre quando a capacidade de um determinado solo (sob determinadas condições de saturação) de absorver água for maior que a intensidade da chuva; do contrário, ocorre escoamento superficial (HORTON, 1933). A quantidade de água armazenada na zona não saturada do solo, geralmente é chamada de umidade do solo (HILLEL, 1998). Essa é uma das fontes de água para a atmosfera, acessada pela evapotranspiração.

### **Demanda de água: evapotranspiração**

Evapotranspiração é o termo utilizado para expressar a ocorrência conjunta dos processos de evaporação e transpiração. Evaporação é o processo pelo qual a água líquida disponível no solo, nos corpos hídricos e interceptada pela vegetação é convertida em vapor d'água (vaporização) e removida da superfície de evaporação. A transpiração está relacionada com a vaporização da água no interior das plantas e posterior difusão para a atmosfera em resposta a um gradiente de concentração de vapor, também chamado de deficit de pressão de vapor- VPD (do inglês, *vapour*

*pressure deficit*).

As condições básicas para a ocorrência da evaporação são: existência de uma fonte de energia  $e$ ; a existência de um gradiente de concentração de vapor, isto é, uma diferença entre a pressão de saturação do vapor na atmosfera à temperatura da superfície e a pressão parcial de vapor d'água na superfície evaporativa. E, por fim, a existência de um abastecimento contínuo de água na superfície evaporativa.

Em relação à transpiração, normalmente sua ocorrência depende das mesmas condições que mantém a evaporação, além de estar atrelada à resistência da planta à perda de água. Tal resistência pode ser dividida em resistência estomática, através da abertura e fechamento dos estômatos; e resistência aerodinâmica, que pode ser definida como a força que se opõe a entrada de moléculas de água no ar. No entanto, a força determinante da perda de água por transpiração é a diferença entre a pressão de vapor de água entre a folha e a atmosfera de entorno, ou seja, VPD (TAIZ; ZEIGER, 2013).

A evapotranspiração e a precipitação assumem assim papel fundamental no sistema solo-planta-atmosfera. Enquanto a precipitação é o principal mecanismo de entrada de água líquida nesse sistema, a evapotranspiração é o principal mecanismo responsável pela saída de água. Tal relação indica a existência de um mecanismo de retroalimentação (*feedback*) entre precipitação e evapotranspiração, por meio da reciclagem da precipitação. A precipitação fornece água para a evapotranspiração e a evapotranspiração fornece água, na forma de vapor, para formação de nuvens e consequentemente, precipitação. Vale ressaltar que os mecanismos de suprimento e demanda hídrica aqui citados dependem de vários fatores, entre eles destaca-se a habilidade do solo em armazenar e reter água para os processos, discutida no item a seguir.

#### **1.2.1.2 Habilidade do solo em armazenar e reter água**

Do ponto de vista de armazenamento e retenção de água, podemos considerar o solo como um sistema trifásico, composto da matriz sólida, água e ar (HILLEL, 1998; PINTO, 2006). A matriz sólida consiste, principalmente, de partículas minerais de várias formas e tamanhos e matéria orgânica. O arranjo das partículas sólidas deixa espaços vazios (poros) de diferentes tamanhos, denominados de poros, os quais permitem o armazenamento e a movimentação da água, íons dissolvidos (solutos) e ar (REICHARDT; TIMM, 2017).

O armazenamento de água no solo depende da porosidade ( $\eta$ ), definida como a relação entre volume de poros ( $V_v$ ) e volume total de uma amostra de solo ( $V_t$ ). O  $V_t$  é composto pelo  $V_v$  e pelo volume dos sólidos ( $V_s$ ):

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_v}{V_v + V_s} \quad (1.4)$$

A porosidade por sua vez, é função da textura e da estrutura do solo, as quais determinam o tipo, tamanho, quantidade e continuidade dos poros. Por exemplo, os solos com textura arenosa são constituídos de partículas com diâmetro maior que os solos argilosos, apresentando, também, poros maiores. Por outro lado, o volume total de poros, e, conseqüentemente, a porosidade, tende a ser pequena nesses solos. Os solos arenosos possuem porosidade total na faixa de 0,32 a 0,47  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  enquanto os solos argilosos variam de 0,52 a 0,61  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  (LIBARDI, 2012; REICHARDT; TIMM, 2017).

A estrutura do solo também influencia a relação entre o conteúdo de água e energia. Um solo bem estruturado possui maior porosidade total e maior capacidade de retenção de água do que um mal estruturado ou que tenha sido compactado. Quanto maior a porosidade total maior a capacidade de retenção de água.

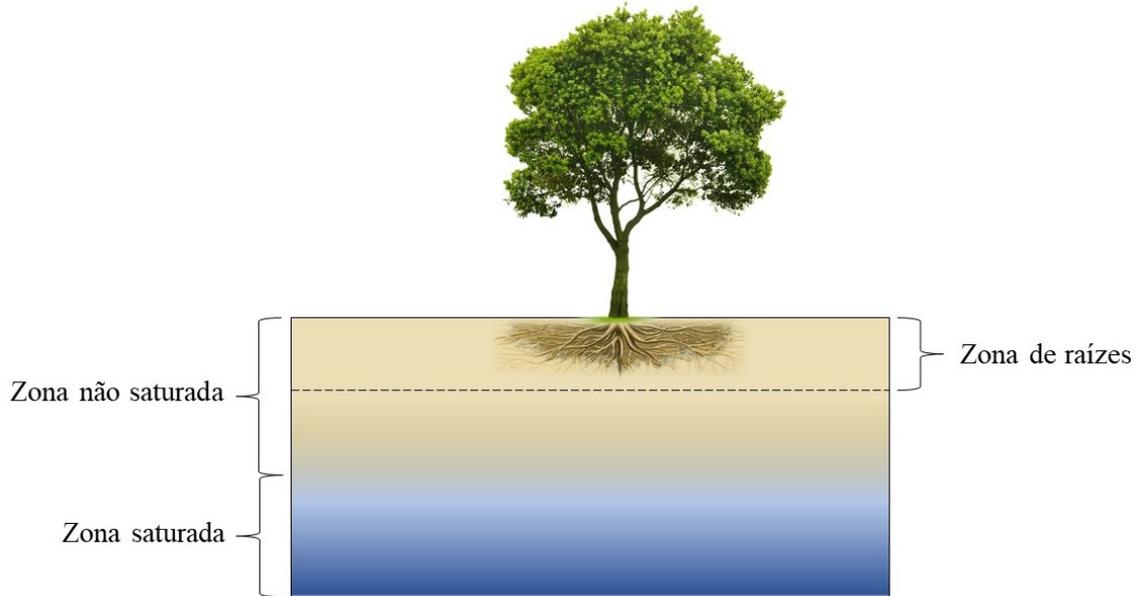
A quantidade de água presente nos poros é representada pelo teor de umidade, expresso por:

$$\theta = \frac{V_a}{V_t} \quad (1.5)$$

onde:  $\theta$  - é a umidade volumétrica do solo,  $V_a$  - o volume de água. Quando todos os poros estão preenchidos com água, diz-se que o solo encontra-se na condição saturada. Nesse caso,  $V_a = V_v$  e, portanto,  $\theta = \eta$ , ou seja, a capacidade máxima de armazenamento de água no solo é a própria porosidade. Por outro lado, quando os poros estão preenchidos por água e ar, diz-se que o solo encontra-se na condição não saturada. Quanto mais seco o solo, maior será a capacidade de armazenamento de água.

A Figura 1.2 apresenta a distribuição do perfil de solo em relação ao grau de saturação. Normalmente, a zona saturada do solo é a mais profunda e encontra-se em contato com o lençol freático. A zona não saturada é a mais superficial, onde são realizadas as trocas com a atmosfera.

Figura 1.2 - Ilustração das zonas saturada e não saturada do solo



Fonte: Adaptado de Seneviratne et al. (2010).

Existem vários métodos para a determinar do conteúdo de água no solo, dentre eles estão os métodos diretos tal como, o método gravimétrico, considerado padrão, que, no entanto, é destrutivo e não permite repetição da amostragem no mesmo local. Por isso, os métodos indiretos [e.g. reflectometria no domínio da frequência - FDR (do inglês, *Frequency Domain Reflectometry*), sonda de nêutrons, etc...)], tem sido mais utilizados para quantificação do conteúdo de água do solo, fornecendo leituras em tempo real, automatizadas e em diferentes profundidades do solo (AL-ASADI; MOUAZEN, 2014; MOUAZEN; AL-ASADI, 2018; SHIN et al., 2005).

A medida da umidade do solo por sonda FDR, também conhecida por sonda de capacitância, baseia-se em um par de eletrodos ou placas metálicas condutoras dispostas em paralelo e separadas por material isolante constituindo-se um capacitor. Quando ativado, a matriz solo-água-ar forma o meio dielétrico deste capacitor. A capacitância aumenta com o aumento do número de moléculas de água livre, e com os dipolos respondendo ao campo elétrico criado pelo capacitor (PALTINEANU; STARR, 1997). Os dados obtidos por esse método têm se mostrado bastante aceitáveis para o monitoramento da água no solo (SOUZA et al., 2013).

## Movimento da água no solo

A movimentação (ou o fluxo) da água no interior do solo ocorre em função das características de retenção de água, relacionadas à capacidade do solo em armazenar e liberar água e da permeabilidade, medida da capacidade do solo em transmitir água (MAIDMENT, 1993).

A direção do movimento de água no sistema sistema solo-planta-atmosfera é definida, primordialmente, pelo gradiente de potencial hídrico. No solo, o potencial hídrico ( $\Psi$ ) pode ser expresso em função de quatro componentes principais:

$$\Psi = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_g \quad (1.6)$$

onde  $\Psi_s$  refere-se ao potencial osmótico,  $\Psi_p$ , ao potencial de pressão hidrostática,  $\Psi_m$  é o potencial mátrico (ou seja, força de ligação entre as moléculas de água e as partículas do solo, também chamada de sucção ou tensão), e  $\Psi_g$  representa o potencial gravitacional. Para fins de simplificação, vamos considerar que o solo tem baixa condutividade elétrica (não salino), assim, podemos desprezar o  $\Psi_s$ . Neste caso, teremos:

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_m + \Psi_g \quad (1.7)$$

Na condição saturada, o potencial mátrico é aproximadamente igual a zero, logo o potencial total da água é dado pelo  $\Psi_g$ , que é determinado pela altura relativa ao plano de referência no qual uma molécula de água se encontra, e pelo  $\Psi_p$ , que é determinado pela altura de coluna d'água acima desta molécula.

Na condição não saturada, como o conteúdo de água é mantido abaixo da saturação, podemos desprezar o  $\Psi_p$  (não existe uma lâmina de água capaz de criar uma pressão hidrostática positiva) e o  $\Psi_g$  (consideraremos um fluxo horizontal, não havendo diferença de altura), como dado:

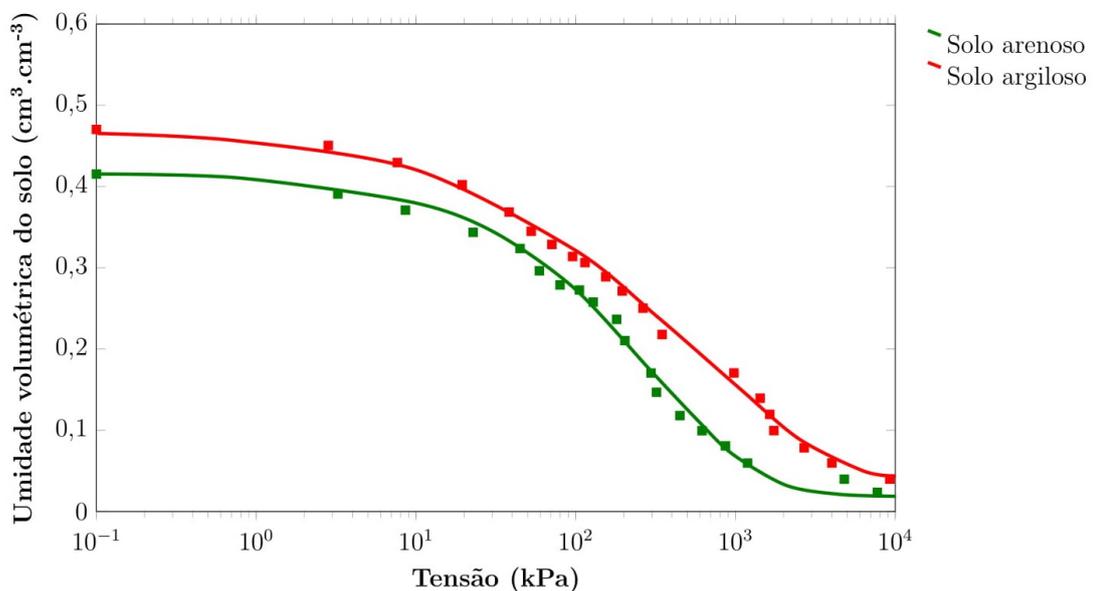
$$\Psi = \Psi_m \quad (1.8)$$

Formalmente, o fluxo de água em solos não saturados é dado por um gradiente de sucção e a água no solo se move da zona de menor sucção (maior teor de umidade

e potencial hidráulico menos negativo) para a zona de maior sucção (menor teor de umidade e potencial hidráulico mais negativo).

A curva de retenção de umidade expressa a relação entre o conteúdo de água, em base de massa ou volume, e a sucção ou potencial matricial da água no solo. A Figura 1.3 apresenta a variação nos formatos característicos das curvas de retenção de umidade de acordo com a textura do solo.

Figura 1.3 - Curvas de retenção de umidade no solo arenoso e argiloso ajustadas por van Genuchten (1980)



Fonte: Adaptado de Candido et al. (2014).

Geralmente, solos que apresentam um alto teor de argila possuem umidade maior para uma dada sucção e a variação da curva é menos acentuada, enquanto que solos mais arenosos, por possuírem poros maiores, quando submetidos a essa mesma sucção são esvaziados mais rapidamente (PINTO, 2006).

### 1.2.1.3 Influência da vegetação no fluxo de água

Quando ocorre um evento de precipitação no solo coberto por vegetação, uma parcela inicial de água é retida pela vegetação. Quanto maior for a superfície de folhagem maior a área de retenção da água durante a precipitação. Esse volume interceptado é evaporado assim que houver demanda atmosférica. Assim que esse volume retido é

totalmente evaporado, as plantas passam a perder umidade para o ambiente através da transpiração (DINGMAN, 2002; GIGLIO; KOBAYAMA, 2013; REICHARDT; TIMM, 2017).

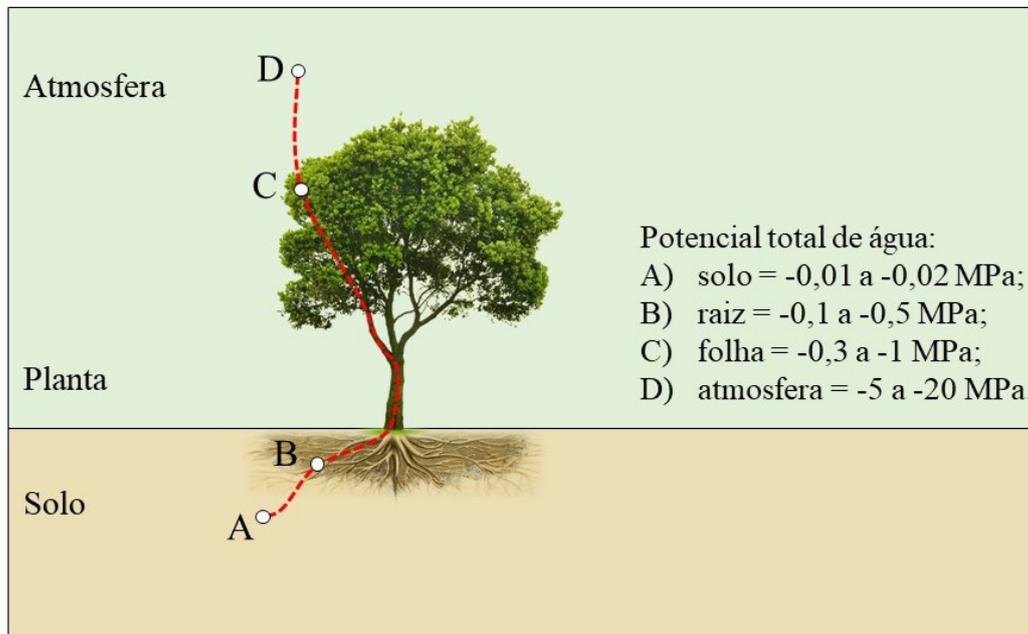
A transpiração refere-se à evaporação da água contida no sistema vascular das plantas para a atmosfera. O processo envolve desde a absorção da água no solo pelas raízes das plantas; até translocação da água líquida por meio do sistema vascular das raízes, caule e ramos para as folhas; sendo nas pequenas cavidades dos estômatos, onde a evaporação ocorre (DINGMAN, 2002).

Quando a umidade do ar no interior da câmara subestomática (de uma folha) é maior que a da atmosfera, desenvolve-se um gradiente de pressão de vapor, resultando na perda de água em forma de vapor do interior da folha para atmosfera (Figura 1.4). Esse gradiente permite que a água seja retirada pelas raízes e transportada através do xilema até chegar às células do mesófilo foliar. A disposição destas células proporciona espaços celulares abundantes, o que representa uma disposição ideal para a evaporação da água a partir da superfície celular. Uma parte da superfície epidérmica da folha está constituída por um grande número de poros (estômatos), responsáveis pela conexão dos espaços intercelulares com o meio externo (TAIZ; ZEIGER, 2013).

O movimento de água em um sistema com cobertura vegetal é apresentado na Figura 1.4, que indica um ponto genérico A no solo, um ponto B na raiz da planta, um ponto C na folha e um ponto D na atmosfera (DURÃES; MAGALHÃES, 2008). Observa-se um gradiente de potencial de água entre o solo e a atmosfera, onde  $A > B > C > D$ , o que irá implicar em movimento da água do maior potencial para o menor.

Uma vegetação do tipo arbórea tem grande capacidade de extrair água de camadas profundas do solo, mesmo quando este se encontra seco. Isso se deve à maior profundidade das raízes, como observado nas florestas de terra-firme da Amazônia e no Cerrado [e.g. Bruno et al. (2006), Nepstad et al. (2002), entre outros]. Com o desmatamento e a substituição por uma cobertura herbácea (pastagem) a profundidade das raízes diminui, logo, a capacidade de extrair água do solo também. Dependendo do tamanho da área alterada, há uma redução da evapotranspiração e do vapor d'água disponível para a atmosfera, fazendo com que a baixa troposfera fique mais seca (D'ALMEIDA et al., 2007; RANDOW et al., 2004). Sendo assim, uma menor quantidade de vapor é transportada verticalmente, reduzindo a formação de nuvens convectivas e a precipitação. A redução na precipitação, por sua vez, leva a uma redução da umidade do solo, o que tende a diminuir ainda mais a área vegetada e sua capacidade de extrair água do solo (NOBRE et al., 1991).

Figura 1.4 - Gradiente de transpiração representado pela diferença entre o potencial total de água no solo, raiz, folha e atmosfera



Fonte: Adaptado de Durães e Magalhães (2008).

Outra influência da vegetação sobre os fluxos de água e de energia ocorre por meio da resistência estomática. Quando a disponibilidade de água no solo é limitada, as plantas, para conservá-la, restringem o fluxo para a atmosfera através de ajustes nas pequenas aberturas dos estômatos, aumentando a resistência das folhas à perda de vapor d'água, diminuindo a difusão de vapor da planta para a atmosfera (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Como a água exerce um papel fundamental na transferência de nutrientes entre vários compartimentos da planta. Dessa forma, mudanças na disponibilidade hídrica podem acarretar alterações nas taxas de crescimento (NEPSTAD et al., 2002).

### Respostas das plantas ao excesso de água no solo

Nas planícies de inundação, as árvores são sujeitas a mudanças periódicas entre uma fase terrestre e uma alagada. Durante a fase alagada, o solo é saturado e/ou submerso. Plântulas e árvores jovens podem ser então completamente inundadas. Árvores adultas altas, ou árvores em níveis mais altos no gradiente de inundação, sofrem inundação das raízes e partes das hastes que causam falta de oxigênio na rizosfera (KOZLOWSKI, 1984).

O alagamento influencia as propriedades físico-químicas do solo, principalmente, o potencial redox do solo, o pH e a concentração de O<sub>2</sub> (ABREU et al., 2007; PARENT et al., 2008). A condição de anóxia ou hipóxia no solo provoca a substituição de organismos aeróbicos por anaeróbicos que causam a desnitrificação e redução de manganês, ferro e enxofre, bem como, o acúmulo de compostos potencialmente tóxicos (ABREU et al., 2007; FERREIRA et al., 1998; KOZLOWSKI, 1984). As condições restritivas de O<sub>2</sub> afetam o crescimento, o desenvolvimento e a sobrevivência das plantas.

A Figura 1.5 apresenta uma síntese dos principais eventos que ocorrem na rizosfera quando o solo está saturado e as respectivas modificações metabólicas e fisiológicas (PARENT et al., 2008). Assim, uma das respostas da planta quando submetida ao alagamento (limitação de oxigênio no solo) é a mudança metabólica da respiração aeróbica para anaeróbica via fermentação (DE SIMONE et al., 2002; DE SIMONE et al., 2003). Como as células vegetais precisam manter um suprimento contínuo de energia (adenosina trifosfato, ATP), o uso de vias alternativas como essa podem ser elemento-chave de sobrevivência sob o solo saturado.

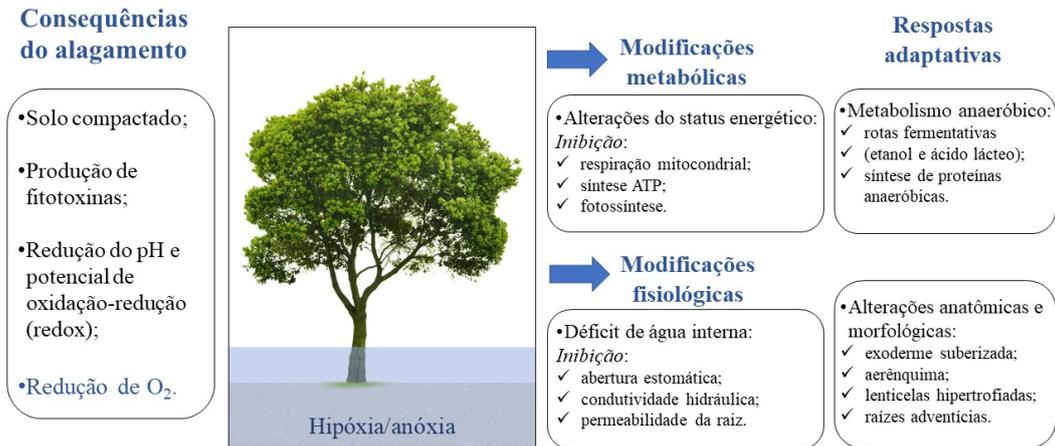
A resposta da planta também pode incluir uma redução na condutância estomática e na fotossíntese, bem como na condutividade hidráulica da raiz (HERRERA, 2013; PAROLIN et al., 2004; PAROLIN, 2010). Contudo, em algumas plantas tropicais tolerantes (e.g. *Acosmium nitens* e *Campsiandra laurifolia*) não ocorrem reduções na taxa fotossintética e na condutância estomática com o avanço do período alagado (HERRERA, 2013).

Entre as adaptações morfológicas incluem a formação de raízes adventícias (raízes aéreas, que visam à captura e ao transporte de oxigênio para os tecidos submersos), aumento da base do caule e hipertrofia das lenticelas (PAROLIN et al., 2004). As lenticelas são pequenos pontos de ruptura na superfície do caule, que fazem contato entre o ambiente e as células do parênquima, dessa forma auxiliam nas trocas gasosas (TAIZ; ZEIGER, 2013). Os biopolímeros da parede celular, como a suberina e a lignina, são depositados nas camadas celulares periféricas da raiz (DE SIMONE et al., 2002), afunilando entrada de água (induz o transporte simplástico) e, dificultando a perda de água da raiz para o ambiente (importante em períodos de seca) (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Outras respostas de plantas ligadas à tolerância à submersão são perda de folhas e reduções no crescimento (SCHÖNGART et al., 2002), bem como, redução na absorção foliar de CO<sub>2</sub>, variando de 10% a 50% mais lento do que na fase seca (Parolin et al. 2004). A absorção de CO<sub>2</sub> aumenta novamente antes do final da fase alagada e

permanece alta durante toda a fase seca (HERRERA, 2013; PAROLIN, 2010).

Figura 1.5 - Principais eventos que ocorrem na rizosfera durante o alagamento e as modificações metabólicas e fisiológicas resultantes



Fonte: Adaptado de Parent et al. (2008).

As respostas das plantas ao alagamento apontam para diminuição no fluxo interno de água e na transpiração, observados por meio das modificações fisiológicas (reduções na condutância estomática, fotossíntese e absorção de CO<sub>2</sub>). Desse modo, pode ser diminuída a participação da planta na perda de água para atmosfera, assim, as taxas de evapotranspiração no período alagado dependerão, principalmente, da evaporação da água livre superficial.

### Crescimento do tronco e condições hídricas no solo e planta

Entende-se por crescimento vegetal o acréscimo das dimensões (peso, volume, altura, ou área), a partir de processos de divisão, alongamento e diferenciação celular (LAMBERS et al., 2008). O crescimento do tronco é atribuído à atividade no câmbio vascular, um tecido meristemático localizado entre a casca e a madeira. O câmbio constrói novas células para o lado interno do tronco, que se diferenciam principalmente em xilema, e novas células para o lado externo do tronco que se diferenciam principalmente em floema (TAIZ; ZEIGER, 2013). Em ambos os casos, a atividade cambial conduz a um aumento no raio do tronco, ou seja, o crescimento diamétrico

ou radial.

O crescimento radial é influenciado pela genética da espécie e pelas condições do ambiente que compreendem basicamente, os fatores de competição (influência de outras árvores, subosque, sombreamento, densidade populacional, presença de animais), climáticos (temperatura, precipitação, vento e insolação), topográficos (inclinação, elevação e aspectos), e edáficos (e.g., características físicas e químicas, umidade do solo) (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Estima-se que 50% das variações no crescimento radial das árvores em florestas tropicais são influenciadas por quatro variáveis climáticas: precipitação, radiação solar (estimada com radiação extra-solar chegando à atmosfera), amplitude de temperatura e umidade do solo Wagner et al. (2013). Segundo os mesmo autores, precipitação e radiação solar respondem por 19,8% e 16,3%, respectivamente, dessas variações, e apresentam uma associação positiva significativa com o crescimento das árvores.

Nas análises existentes sobre a relação entre a umidade do solo e o crescimento, considera-se que esse último não é um fator diretamente controlado pela umidade do solo, mas pelo equilíbrio hídrico da planta (e.g. condições de turgor e potencial hídrico no câmbio), que possibilitam a divisão e o alongamento celular (TAIZ; ZEIGER, 2013; STEPPE et al., 2005). O equilíbrio hídrico da planta pode ser afetado pelas condições de umidade do solo e demanda atmosférica, pela taxa de transpiração, disponibilidade de água no solo, pela temperatura, processos osmóticos na casca e outros fatores (DE SCHEPPER; STEPPE, 2010).

Diariamente o raio do tronco pode variar com a taxa de transpiração. No início da manhã, quando a taxa de transpiração é alta, o caule pode perder água principalmente da casca e do câmbio (ZWEIFEL et al., 2001), como também do xilema imaturo (ZWEIFEL et al., 2014) para atender a demanda atmosférica (ZWEIFEL et al., 2016). A perda de água é proporcional a diminuição no diâmetro do tronco (DE SCHEPPER; STEPPE, 2010; ZWEIFEL et al., 2000) denominado contração do tronco induzido por deficit hídrico (HINCKLEY; BRUCKERHOFF, 1975). A medida que a taxa de transpiração reduz, a água que foi perdida pode ser recarregada (ZWEIFEL et al., 2016). Enquanto na escala sazonal (intranual), o tronco pode expandir à medida que o teor de umidade na casca aumenta e, em função da produção de madeira, ou declinar durante as estações do ano/períodos secos, por desidratação (STAHL et al., 2010; ZWEIFEL et al., 2000).

O crescimento do tronco pode ser monitorado por instrumentos que informam di-

retamente a variação da circunferência (dendrômetro manual) ou do raio do tronco (dendrômetro automático de alta resolução) (DREW; DOWNES, 2009). O dendrômetro manual, é um equipamento com menor precisão (0,05 mm), depende de um operador para coletar os dados, mas é de fácil manuseio, instalação, e principalmente, aquisição muito econômica, comparado com o dendrômetro automático, cuja aquisição ainda é muito onerosa no Brasil e demanda uma fonte autônoma de energia. No entanto, esse último, monitora a variação do tronco com precisão de micrômetros, na frequência de segundos ao longo do dia, e dispensa a presença do operador para aquisição dos dados, uma condição fundamental em áreas de difícil acesso, como as alagáveis.

Diante das limitações de cada equipamento, o dendrômetro manual tem sido utilizado para determinar o incremento anual do tronco, como também para analisar a variação intra-anual em função das condições climáticas, em uma escala temporal mensal e anual (DREW; DOWNES, 2009; WAGNER et al., 2013; WAGNER et al., 2014; WAGNER et al., 2016). Mas, para se obter informações em uma resolução temporal de dias ou semanas, o uso do dendrômetro automático (alta resolução) é o mais utilizado [e.g., Wagner et al. (2016)].

Como os dendrômetros realizam medidas sobre a casca, a principal dificuldade para interpretar as variações radiais do caule se deve a processos potencialmente co-ocorrentes e parcialmente opostos. Por um lado, há a expansão irreversível do tronco das células em crescimento, ou seja, o aumento radial devido à divisão e alongamento das células (denominado crescimento irreversível). Por outro lado, há o encolhimento induzido pelo déficit hídrico na árvore, causado por desequilíbrios entre a transpiração e a captação da água da raiz, e o inchamento (crescimento reversível), pela reposição de água nos tecidos (ZWEIFEL et al., 2005). Fenômenos como encolhimento e inchaço são mais perceptíveis na escala diária (KING et al., 2013).

O crescimento irreversível é um processo unidirecional que aumenta apenas o raio do tronco, enquanto a mudança dos potenciais da água é bidirecional e pode levar ao aumento ou diminuição do raio. Consequentemente, o encolhimento radial do tronco é sempre atribuível à diminuição dos potenciais da água e, assim, ao aumento do déficit hídrico da árvore sob a suposição de que não há degradação estrutural do tecido do caule Zweifel et al. (2016). O aumento radial, no entanto, pode ser induzido pelo retorno da água e, portanto, inchamento dos tecidos ou pelo crescimento irreversível (DREW; DOWNES, 2009). No entanto, na escala sazonal, estudos envolvendo condições hidroclimáticas e variação do diâmetro do tronco, sugeriram que a taxa

de crescimento é impulsionada pela atividade cambial, não pelas condições hídricas do tronco (WAGNER et al., 2013). Porém ainda existem muito debate científico para compreender esses fenômenos.

Zweifel et al. (2016) afirmam que além de várias abordagens numéricas que quantificam as variações do raio do tronco sem distinguir explicitamente entre os dois componentes fisiológicos, encolhimento e inchaço [e.g., King et al. (2013), VAN DER MAATEN et al. (2013)], existem uma abordagem de particionamento descrita na literatura, baseada no conceito de ausência de crescimento ou crescimento zero durante os períodos de encolhimento do tronco, ou seja, maior período de deficit hídrico. Baseado nesse conceito, Zweifel et al. (2016) propuseram o modelo de crescimento zero (modelo ZG, do inglês *zero growth model*), onde qualquer potencial expansão do raio do tronco ocorre após o término dos períodos de deficit hídrico e, o crescimento aumenta quando o raio máximo atual é excedido ao longo do tempo.

Alguns trabalhos realizados na floresta Amazônica utilizaram o modelo ZG para filtrar as condições de encolhimento e inchaço do tronco utilizando dados de variação diária do raio do tronco medidos continuamente até cerca de 2 anos (BARROS, 2017; SOUZA, 2018). O uso do método dispensou o uso parametrizações complexas para corrigir os efeitos das condições hídricas do tronco e, contribuiu para a análise da variação sazonal do tronco associado com as condições hídricas do local (SOUZA, 2018).

Outros pesquisadores têm optado apenas por adicionar dados complementares (precipitação, taxa de crescimento e status hídrico do xilema, índices espectrais de vegetação - EVI, e outros) aos registros dos dendrômetros para compreender as influências das condições ambientais na variação observada [e.g., Silva et al. (2003), Wagner et al. (2013), Wagner et al. (2016)]. Wagner et al. (2013), por exemplo, reportaram significativa sazonalidade intra-anual em florestas sazonalmente secas ou em tropicais úmidas em função dos fatores climáticos, como precipitação, radiação solar, amplitude de temperatura e umidade do solo. No mesmo sentido, vários trabalhos destacaram que o período chuvoso foi mais benéfico para o crescimento das árvores em florestas de terra-firme, do tipo tropical úmida, tropical sazonalmente secas, e estacional semidecidual, quando comparado com o período seco (GROGAN; SCHULZE, 2012; LISI et al., 2013; SILVA et al., 2003; WAGNER et al., 2014). Em floresta do bioma Cerrado, o crescimento do tronco diminuiu ou entra em dormência devido as condições hidroclimáticas do ambiente (ROSSATTO et al., 2009).

Em contraste nas florestas sazonalmente alagável da Amazônia central, o cresci-

mento do tronco é restrito ao período não alagado (WORBES, 1997; SCHÖNGART et al., 2002). Mesmo adaptadas ao alagamento (PAROLIN, 2010), o crescimento das árvores é reduzido durante a inundação, devido condições anaeróbias nas raízes, levando a uma redução da atividade radicular, redução da condutância de água (JUNK et al., 2011; PAROLIN et al., 2010), queda das folhas, e dormência cambial por até 2 meses (WORBES, 1997; SCHÖNGART et al., 2002). Esses resultados sugerem que o crescimento das árvores tropicais será maior no futuro em florestas alagáveis e reduzida em florestas de terra-firme se a oferta de água for reduzida nesses ambientes.

### Medida de status hídrico foliar

Medidas de potencial hídrico foliar ( $\Psi_{foliar}$ ) têm sido frequentemente utilizadas para avaliar ou prever as estratégias de uso da água em condições limitantes [e.g., Barros (2017), Bartlett et al. (2012), Parolin et al. (2006), Parolin et al. (2010)]. Isso porque a perda de turgor celular, um dos componentes do  $\Psi_{foliar}$ , é o indicador clássico mais bem reconhecido de estresse hídrico foliar (BARTLETT et al., 2012), tendo impactos na integridade estrutural das células, no metabolismo e desempenho da planta (TAIZ; ZEIGER, 2013).

A perda de turgor tem sido associada com fechamento dos estômatos (BRODRIBB; HOLBROOK, 2003), inibição da fotossíntese (BARTLETT et al., 2012), crescimento de plantas (DALMOLIN et al., 2012) ou com outras respostas das plantas às condições limitantes de água (BARROS, 2017; BRUM JUNIOR, 2013). Portanto, a determinação do ponto de perda de turgor fornece informações sobre a capacidade da planta suportar diferentes condições de estresse, mantendo uma atividade fisiológica adequada.

O turgor celular é a distensão da camada protoplásmica e da parede de uma célula vegetal pelo conteúdo líquido. A pressão envolvida nesse fenômeno é chamada de pressão de turgor ( $\Psi_s$ ). A  $\Psi_s$  representa o efeito dos solutos dissolvidos sobre o potencial hídrico.

Os principais componentes que influenciam no potencial hídrico das plantas são: o osmótico ( $\Psi_s$ ), a  $\Psi_p$ , e potencial gravitacional ( $\Psi_g$ ;  $0,01 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ ) (CONNOR et al., 1977). No entanto, quando se analisa o transporte de água em nível celular, o  $\Psi_g$  é geralmente omitido porque é desprezível comparado com o  $\Psi_s$  e a  $\Psi_p$  (TAIZ; ZEIGER, 2013). Assim, a expressão matemática do potencial hídrico pode ser descrita como:

$$\Psi = \Psi_s + \Psi_p \quad (1.9)$$

A técnica conhecida como “curva pressão-volume” estima os componentes  $\Psi_s$  e  $\Psi_p$ , do  $\Psi$  em uma mesma folha ( $\Psi_{foliar}$ ), bem como as massas de água perdidas. A curva pressão-volume mede o declínio do  $\Psi_{foliar}$  e do conteúdo relativo da água (CRA) com a desidratação da folha (SCHULTE; HINCKLEY, 1985; TURNER, 1981). Para isso essa curva relaciona o inverso do potencial hídrico foliar ( $1/\Psi_{foliar}$ ) com a perda relativa de água da folha ( $R = 100 - CRA$ ), como exemplificado na Figura 1.6.

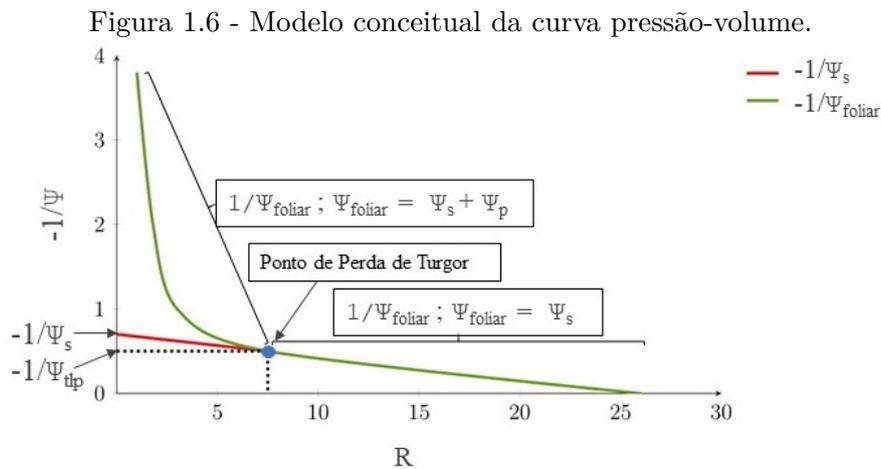


Gráfico do inverso do potencial hídrico ( $1/\Psi$ ) em função da perda relativa de água ( $R = 100 - \text{Conteúdo relativo de água}$ ; unidade %). O potencial hídrico foliar ( $\Psi_{foliar}$ , em MPa) é a soma do potencial de pressão ( $\Psi_p$ ) e do potencial osmótico ( $\Psi_s$ ). Quando  $\Psi_p = 0$ ,  $\Psi_{foliar} =$  o ponto de perda do turgor ( $\Psi_{tlp}$ ).

Fonte: Adaptado de Bartlett et al. (2012).

A relação entre  $1/\Psi_{foliar}$  e  $R$  exibe uma linha que apresenta-se inicialmente curvilínea, devido à soma do  $\Psi_s$  e  $\Psi_p$  (Figura 1.6). Quando  $\Psi_p$  deixa de exercer seu papel no potencial hídrico foliar, as células da folha se tornam flácidas/murchas, ou seja perdem o turgor. O valor do  $\Psi_{foliar}$  quando ocorre o murchamento é denominado ponto de perda de turgor ( $\Psi_{tlp}$ ). Nesse ponto, o  $\Psi_p$  é zero, e o  $\Psi_{foliar}$  se iguala ao  $\Psi_s$ . Na porção linear, segunda região da curva ( $\Psi_{foliar} = \Psi_s$ ), mudanças subsequentes no  $\Psi_{foliar}$  podem ocorrer em função da concentração osmótica (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Outros cinco parâmetros adicionais sobre as relações hídricas dos tecidos associados ao  $\Psi_{tlp}$ , podem ser calculados a partir da curva pressão-volume, como o potencial osmótico (simplástico, que corresponde o espaço interior à membrana plasmática)

na hidratação máxima, módulo de elasticidade da parede celular ( $\epsilon$ , rigidez da parede celular), CRA (conteúdo relativo de água) no  $\Psi_{\text{tlp}}$ , fração apoplástica (e.g., proporção de água externa ao protoplasto celular) e a capacitância do tecido, todos associados a vários aspectos da resistência à seca (BARTLETT et al., 2012).

O  $\Psi_{\text{tlp}}$  tem sido utilizado para avaliar a tolerância fisiológica à seca durante décadas. Árvore com baixos valores de  $\Psi_{\text{tlp}}$  tendem a manter a condutância estomática e hidráulica, trocas gasosas e crescimento em solos com baixo potencial hídrico (SACK et al., 2003), relacionados a ambientes com baixa disponibilidade de água. Por isso, o  $\Psi_{\text{tlp}}$  foi utilizado para avaliar a resistência à seca em programas de melhoramento vegetal, seleção de espécies para reflorestamento (SANCHO-KNAPIK et al., 2013) e está correlacionado com outros importantes parâmetros de tolerância à seca, como o potencial hídrico no ponto em que 50% da condutância hidráulica no xilema ( $P_{50}$ ) é perdida (VILLAGRA et al., 2013). No entanto, apesar de seu uso potencial como um indicador de tolerância à seca [e.g., Bartlett et al. (2012), Blackman et al. (2010)], existem inúmeras incertezas quanto a sua aplicação e interpretação.

Um dos questionamentos cercou o papel da contribuição de outros parâmetros da curva pressão-volume na tolerância à seca. O  $\Psi_{\text{tlp}}$  e outros parâmetros da curva, como o R no ponto de perda de turgor e o potencial osmótico em completa hidratação, foram propostos alternativamente como preditores da tolerância à seca fisiológica, e possivelmente da seca ecológica, sem um teste global para fundamentar seu uso (BARTLETT et al., 2012). Como esses parâmetros são tipicamente ajustados simultaneamente, suas respostas a disponibilidade de água entre e dentro dos biomas permaneceu obscura. No mesmo sentido, são escassos estudos globais que testem a importância desse parâmetros entre espécies e a nível de comunidade, ou a importância do  $\Psi_{\text{tlp}}$  quando comparado com outras características, como o  $P_{50}$ .

Bartlett et al. (2012) enfatizaram que existem um contra-argumento de que um  $\Psi_{\text{tlp}}$  menos negativo pode ser benéfico. De acordo com essa visão, um  $\Psi_{\text{tlp}}$  menos negativo permite que as folhas rapidamente percam turgor e fechem seus estômatos à medida que a perda de água aumenta e, assim, mantém um o conteúdo de água alto (READ et al., 2006). Na verdade, alguns argumentaram que a manutenção da hidratação celular é mais importante do que o turgor (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Em 2012, uma meta-análise de 317 espécies vegetais extraídas em 72 estudos esclareceu parte dos questionamentos acima, e mostrou que o  $\Psi_{\text{tlp}}$  estava fortemente correlacionado com a disponibilidade de água dentro e entre os biomas, indicando poder do indicador para antecipar as respostas da seca (BARTLETT et al., 2012).

Segundo os mesmos autores, existe uma forte associação do  $\Psi_{tlp}$  com tolerância de seca não só em termos fisiológicos, mas também ecológicos. Esse estudo reforça o uso do índice como preditor de tolerância à seca foliar.

### 1.2.2 Florestas sazonalmente alagáveis na região amazônica

Áreas úmidas são ecossistemas específicos que ocupam a interface entre os ecossistemas aquáticos e terrestres (PIEIDADE *et al.*, 2013). Entre as várias classificações existentes, as áreas úmidas podem ser divididas em dois grandes grupos de acordo com o seu regime hidrológico: (1) áreas com coluna de água relativamente estável, por exemplo, os pântanos e turfeiras; e (2) as áreas úmidas com grandes flutuações de nível da água, como as áreas sazonalmente alagáveis (PIEIDADE *et al.*, 2013).

Um exemplo de áreas sazonalmente alagáveis, são as que acompanham os grandes rios amazônicos, como o Solimões/Amazonas. Os processos e padrões ecossistêmicos nessas áreas são determinados pelas variações anuais do nível d'água do rio, e pela alternância entre as fases de seca e cheia (JUNK, 1997; JUNK *et al.*, 2013).

O padrão sazonal de variação do nível da água, também chamado de “pulso de inundação”, atua como principal forçante de escala local sobre as áreas sazonalmente alagáveis e influencia profundamente na distribuição das comunidades vegetais e animais segundo o comportamento da inundação em cada local (JUNK *et al.*, 1989). O pulso de inundação pode variar em frequência (monomodal ou multimodal), previsibilidade (previsível ou imprevisível), amplitude (baixa ou alta) e duração (curta ou longa) (JUNK *et al.*, 2013).

Vastas áreas alagáveis são ocupadas por florestas (florestas sazonalmente alagáveis), que desempenham papel importante no ciclo da água e no clima, pois formam um sistema eficiente de retenção de água, contribuem para a regulação do clima regional por meio das altas taxas de evapotranspiração, diminuem a amplitude do nível dos rios entre os períodos de cheias e secas (JUNK *et al.*, 1989; JUNK *et al.*, 2013).

Na Amazônia brasileira, cerca de 7% da área (400.000 km<sup>2</sup>) correspondem as florestas sazonalmente alagáveis regida por pulso monomodal, previsível, de alta amplitude e longa duração (MELACK; HESS, 2010). De acordo composição hidroquímica das águas dos rios que as margeiam e a florística (JUNK, 1997), essas áreas podem ser divididas em: florestas de várzeas e florestas de igapós.

As florestas sazonalmente alagáveis ao longo dos rios de águas brancas, tais como o rio Amazonas, o Purus e o Madeira, são conhecidas como florestas de várzea e

cobrem uma área de cerca 5% (300.000 km<sup>2</sup>) do total de áreas alagáveis amazônicas (MELACK; HESS, 2010). Esses ambientes são bastante férteis, pois os rios a elas associados se originam e percorrem regiões geologicamente recentes, nas faixas andinas e pré-andinas. Devido ao fluxo sazonal de nutrientes, as planícies de inundação de água branca permanecem excepcionalmente produtivas (PIEPALE et al., 2013). O alto teor de sedimentos em suspensão induz um sistema altamente dinâmico, caracterizado por intensos processos de sedimentação e erosão (WITTMANN et al., 2004). Este dinamismo aluvial cria um mosaico de habitats que, juntamente com substratos altamente férteis, são as razões subjacentes para que a floresta de várzea tenha a maior riqueza de espécies arbóreas em todo o mundo (WITTMANN et al., 2010).

Os outros 2% do total de áreas alagáveis amazônicas, cerca de 100.000 km<sup>2</sup> (PIEPALE et al., 2013), são constituídas por florestas inundadas por rios de águas negras ou de águas claras, colectivamente conhecidas como igapó. Esses rios (por exemplo, Negro, Tapajós e Tocantins) originam-se em formações pré-cambrianas, em áreas geologicamente antigas e erodidas dos escudos das Guianas e Brasil Central (IRION et al., 2010). Eles carregam uma carga reduzida de elementos inorgânicos suspensos comparados aos rios de águas brancas, logo a fertilidade da planície de inundação é, portanto, menor comparado com as das várzeas. Estudos comparativos em planícies de inundação na Amazônia central mostram que a várzea geralmente abriga um maior número de espécies arbóreas do que igapó [e.g., (WITTMANN et al., 2010)].

As adaptações das espécies da várzea ao alagamento se apresentam sob diferentes formas, níveis e combinações, tais como: raízes adventícias, formação de aerênquima no córtex da raiz, enriquecimento da rizosfera com o oxigênio, redução da fotossíntese, metabolismo anaeróbico, dentre outras (DE SIMONE et al., 2002; DE SIMONE et al., 2003; FERREIRA et al., 2010; HAASE; RÄTSCHE, 2010; PAROLIN et al., 2004).

Devido à grande variabilidade geomorfológica (LATRUBESSE, 2008), associada à variabilidade climática e hidrológica, a duração do alagamento e o nível da água superficial variam substancialmente ao longo da Bacia Amazônica, afetando as comunidades de plantas em muitos aspectos. Esse efeito pode ser observado na mudança da composição florística das florestas alagáveis ao longo do gradiente topográfico, organizados segundo o grau de adaptação das espécies arbóreas às inundações (WITTMANN et al., 2010).

Wittmann et al. (2002) observando as mudanças da composição das espécies arbóreas ao longo do gradiente de inundação, dividiram as áreas de várzeas em “várzea baixa”, encontradas mais próximas das margens dos rios e sujeitas anualmente a inundações;

e “várzea alta”, nas cotas mais elevadas dos terrenos, podendo apresentar anos nos quais a inundação é ausente.

Na várzea baixa, a estrutura e composição das espécies dependem dos estágios de sucessão, porém o seu número é reduzido pelo impacto causado pelo alagamento prolongado (WITTMANN et al., 2002; WORBES et al., 1992). Como resposta às inundações prolongadas, as árvores nos primeiros estágios secessionais frequentemente exibem adaptações às condições anóxicas, como, por exemplo, redução na atividade metabólica durante a fase alagada (PAROLIN et al., 2002). Várias espécies arbóreas das várzeas baixas trocam suas folhas principalmente durante a fase alagada (SCHÖNGART et al., 2002), enquanto muitas espécies arbóreas da várzea alta apresentam troca foliar na época seca (PAROLIN et al., 2010). Como a inundação é reduzida na várzea alta, muitas espécies da terra-firme adjacente podem se estabelecer nesse ambiente (WITTMANN et al., 2002).

Outras florestas sazonalmente alagáveis da Amazônia que merecem destaque são aquelas situadas na planície de inundação do rio Araguaia (região da Ilha do Bananal), localizadas na borda sudeste da região amazônica, zona de transição entre floresta tropical úmida e Cerrado, com área total de 58.600 km<sup>2</sup> (MELACK; HESS, 2010).

O rio Araguaia nasce na serra dos Caiapós, numa altitude de 850 m, na divisa dos Estados de Goiás e Mato Grosso e, depois de percorrer 720 km, divide-se em dois braços: O Araguaia e o Javaés, formando a maior ilha fluvial do mundo, a Ilha do Bananal no estado do Tocantins, com extensão aproximada de 300 km (AQUINO et al., 2008).

Segundo Latrubesse e Stevaux (2002), o rio Araguaia é dividido em três segmentos: alto, médio e baixo. O alto Araguaia drena uma área de 36.400 km<sup>2</sup> e se desenvolve da cabeceira até a cidade de Registro do Araguaia-GO. O médio curso se estende por 1.600 km desde de Registro do Araguaia até Conceição do Araguaia-PA. Nesse segmento encontra-se uma planície de inundação (aluvial) bem desenvolvida, constituída por um complexo mosaico de unidades morfossedimentares formadas por sedimentos do Holoceno e do Pleistoceno tardio (AQUINO et al., 2008; LATRUBESSE; STEVAUX, 2002), por isso a área de drenagem aumenta consideravelmente (maior que 300.000 km<sup>2</sup>). Depois da localidade de Conceição do Araguaia inicia o baixo Araguaia, até sua confluência com o rio Tocantins.

A composição das famílias botânicas na planície de inundação do rio Araguaia é

semelhante às florestas de várzea da Amazônia Central e muitas espécies tolerantes a inundações amplamente distribuídas são compartilhadas (KURZATKOWSKI et al., 2015). A colonização de habitats nesse ambiente está fortemente ligada à resistência e adaptação das árvores às inundações anuais na planície.

Existe uma alta variação inter-anual nos níveis de inundação na planície de inundação do Araguaia, mas a duração das enchentes é em média duas vezes menor e o nível de inundação é quatro vezes menor do que na florestas das várzea ou igapó da Amazônia Central. Outra diferença com essas florestas é a ocorrência de um período seco prolongado, com duração de cinco meses com precipitação menor que 50 mm.mês<sup>-1</sup> (MARCUIZZO; GOULARTE, 2013). Assim, o crescimento das árvores tende a ser limitado por duas condições estressantes, alagamento e seca, no decorrer de um ano.

O efeito do alagamento e da seca no crescimento das árvores nas florestas sazonalmente alagável do Araguaia recebeu pouca atenção quando comparado com as florestas de várzeas e igapó da Amazônia. Os poucos estudos realizados nesse ambiente apontaram menor crescimento das árvores comparado com várzeas, devido principalmente aos efeitos da seca prolongada e as condições nutricionais do solo (HOMEIER et al., 2017; KURZATKOWSKI et al., 2015). Durante a fase seca, a biomassa acima do solo reduz e a perda de folhas aumenta com o avançar do período (KURZATKOWSKI et al., 2015; MOREIRA et al., 2005). Esse comportamento indica que períodos prolongados de seca, como nos anos de extremos climáticos, podem limitar ainda mais o crescimento das árvores nesse ambiente.

#### **1.2.2.1 Efeito dos eventos extremos de seca e inundação em áreas alagáveis**

Eventos de El Niño-Oscilação Sul - ENSO (do inglês, *El Niño-Southern Oscillation*) e a anomalias na temperatura superficial do mar (TSM) no Atlântico tropical são frequentemente apontados como causadores de secas na Amazônia (BORMA; NOBRE, 2013; JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016; MARENGO et al., 2008a; MARENGO et al., 2008b). Enquanto outros estudos atribuíram (a) a ocorrência de eventos intensos de El Niño, (b) o forte aquecimento nas águas superficiais do Atlântico Norte tropical durante o verão-outono do Hemisfério Norte, ou (c) ambos (AALTO et al., 2003; FOLEY et al., 2002; MARENGO et al., 2008a).

O ENSO é um fenômeno climático que causa anomalias na TSM na região do Pacífico Equatorial, que possui uma componente oceânica, o El Niño ou a La Niña, e uma

componente atmosférica, a Oscilação Sul. O El Niño corresponde ao aquecimento anômalo da TSM no oceano Pacífico Tropical central e leste, e a La Niña, representa o resfriamento anômalo da TSM no oceano Pacífico Tropical central e leste. A Oscilação Sul corresponde a flutuações na pressão atmosférica ao nível médio do mar entre a alta subtropical do Pacífico sudeste e a baixa pressão no norte-nordeste da Austrália (PHILANDER, 1989).

A *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) monitora a evolução das anomalias de TSM no oceano Pacífico Tropical utilizando índices baseados na medição da TSM em quatro regiões do Pacífico Equatorial denominadas de Niño 1+2, 3, 3.4 e 4. Na região de Niño 3.4 também existe um índice para acompanhamento das anomalias de TSM chamado de *Oceanic Niño Index* (ONI), calculado por meio de médias trimestrais móveis (DJF, JFM, etc) de anomalias da TSM.

Quando a diferença da TSM em relação à média histórica é superior a  $0,5^{\circ}\text{C}$  por pelo menos cinco trimestres móveis consecutivos caracteriza-se El Niño, caso contrário, caracteriza La Niña. Diferenças inferiores a  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  correspondem à condição de neutralidade. Os eventos de El Niño ou La Niña, de acordo com o índice ONI podem ser classificados como muito forte, forte, moderado e fraco.

O El Niño de 2015/2016 foi de intensidade “Muito Forte” segundo o índice ONI, e com duração prolongada (L'HEUREUX et al., 2017; JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016; PEREIRA et al., 2017; YANG et al., 2018). O evento de ENSO prolongado, combinado com a tendência de aquecimento regional contribuíram para um aquecimento sem precedentes e maior área sob seca extrema na Amazônia (até cinco vezes mais), em comparação com os fortes eventos anteriores de 1982/83 e 1997/98 (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016). Nesse período a precipitação na Amazônia de agosto de 2015 a julho de 2016 foi a mais baixa desde 2000 (YANG et al., 2018).

Nos anos marcados por eventos extremos de seca, geralmente, as inundações são menores e a fase seca nas planícies da Amazônia é prolongada (MARENGO et al., 2008a; MARENGO et al., 2008b; MARENGO et al., 2011; SCHÖNGART et al., 2004). Esses eventos são potencialmente deletérios para as florestas de terra-firme, mas para as florestas de várzea baixa têm-se mostrado menos impactantes (SCHÖNGART et al., 2002; SCHÖNGART et al., 2004; PAROLIN, 2010; PIEDADE et al., 2013).

A seca de 1926, considerada maior anomalia do ciclo hidrológico nos últimos 100 anos (WILLIAMS et al., 2005), favoreceu o crescimento de espécies arbóreas na várzea baixa da Amazônia central (SCHÖNGART et al., 2004). Já a várzea alta apresentou

um padrão diferente, ou seja, a taxa de crescimento reduziu. Como suas áreas são sujeitas a inundações de pouca duração (e às vezes as cheias não alcançam essas áreas), a época de seca é mais prolongada. O mesmo efeito foi observado nos anos de 2004 e 2005, quando vastas áreas foram expostas por cerca de cinco meses a valores de precipitação abaixo de 100 mm por mês (PIEIDADE et al., 2013).

Geralmente, o prolongamento da fase seca é considerado favorável para a maioria das árvores de áreas alagadas da Amazônia, uma vez que seu estabelecimento, e o crescimento radial e em altura são limitados à fase seca (LAMBERS et al., 2008; SCHÖNGART et al., 2002; WORBES, 1997). No entanto, Oliveira-Wittmann et al. (2010) estudando o efeito da seca em plântulas de algumas espécies arbóreas de várzea, identificaram reduções significativas na taxa fotossintética e no crescimento.

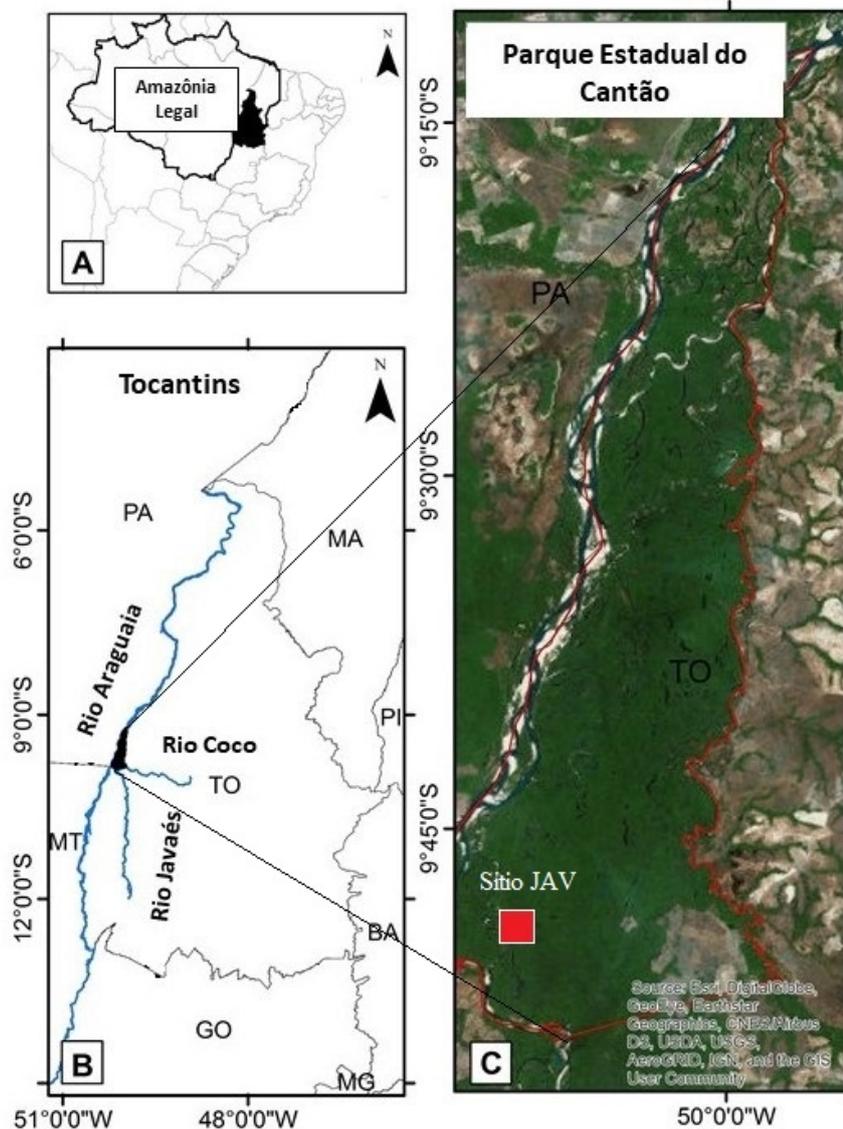
Enquanto as florestas de várzeas dos rios Solimões/Amazonas apresentam uma certa tolerância à seca, a área sazonalmente alagável do rio Araguaia pode ser mais sensível. Trabalhos realizados nessa planície utilizando sistema de vórtices turbulentos para medir fluxos de água e energia e sensores de umidade no solo (BORMA et al., 2009; COSTA, 2015) observaram que em anos considerados “normais” (2004 e 2006), a quantidade de água armazenada no solo (até 2,0 m de profundidade) parecia suficiente para suprir a evapotranspiração ao longo do período seco. No entanto, durante a seca de 2005, estudos mostraram que a água armazenada nessa camada limitou a evapotranspiração à medida que a seca extrema progrediu. Segundo Borma et al. (2009), a redução do alagamento (oferta de água) no período chuvoso, pode ter afetado mais a evapotranspiração no período seco, comparado como o aumento no saldo de radiação nesse período.

Como a princípio, as florestas sazonalmente alagáveis respondem de forma diferente aos efeitos da seca, faz-se necessário conhecer os fatores que podem contribuir para as diferenças observadas. No caso do crescimento da floresta, investigações sobre a contribuição dos solos (em termos de disponibilidade de água), e condições hidroclimáticas de forma integrada poderão elucidar parte das lacunas sobre as respostas das plantas aos períodos de seca e alagamento. Por isso, abordagens que detalham melhor o comportamento das árvores, por meio de estudos ecohidrológicos e ecofisiológicos contribuirão para elucidar ou refutar os indícios mencionados na literatura, como por exemplo, de maior crescimento das florestas sazonalmente alagáveis nos anos de seca extrema.

### 1.3 Área de estudo: sítio experimental do Javaésinho

A área de estudo compreende um dos sítios de pesquisa do Programa LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera da Amazônia), o sítio experimental do Javaésinho (sítio JAV), localizado no Parque Estadual do Cantão (PEC) uma unidade de proteção integral, no Estado do Tocantins, cidade de Pium, distante cerca de 260 km de Palmas, capital do estado (Figura 1.7).

Figura 1.7 - Localização do sítio JAV, Parque Estadual do Cantão, Tocantins.



Delimitação do estado do Tocantins na Amazônia legal (A); localização do Parque estadual do Cantão-PEC no Tocantins e delimitações; (B) Sítio experimental do Javaésinho (sítio JAV) no PEC. Imagem Sentinel-2 composta em junho de 2018. Fonte: Adaptado de Fonseca et al. (2019).

O PEC foi criado em 1989 e abrange uma área de aproximadamente 89 ha, situada na região de transição entre dois grandes biomas: Amazônia e Cerrado (TOCANTINS, 2016). Os limites naturais do parque são os rios Araguaia, Coco e Javaés. Ao longo do seu curso médio, o rio Araguaia se divide em dois, um formado pelo próprio rio Araguaia e o outro pelo rio Javaés, dando origem à ilha do Bananal, reconhecida por ser a maior ilha fluvial do mundo. O PEC está localizado ao longo do rio Javaés, na margem oposta à ilha do Bananal. Em função dessa localização o sítio é também chamado dentro do programa LBA, de sítio Bananal.

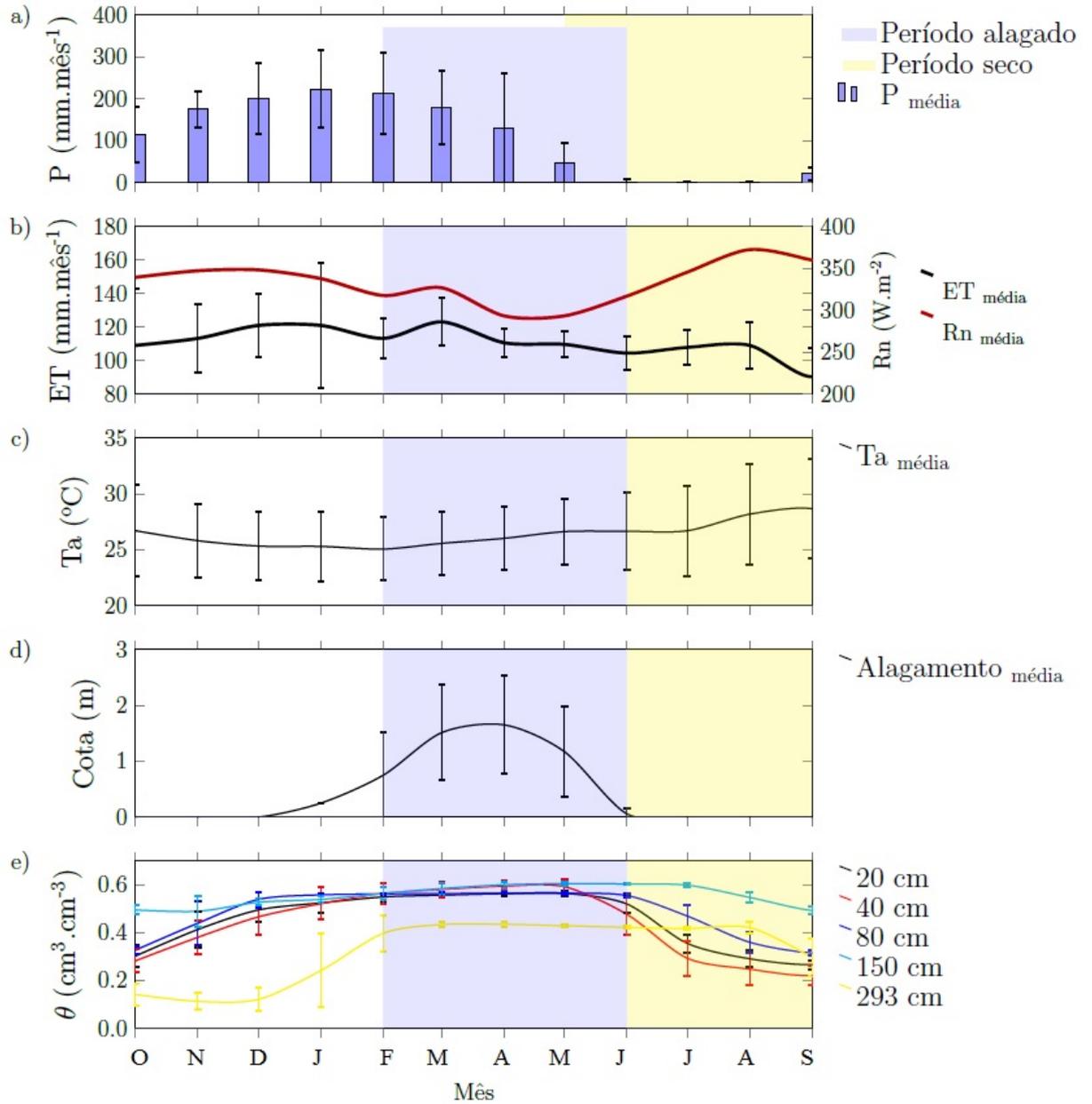
Esta região é constituída por um complexo mosaico de unidades morfo-sedimentares formado por sedimentos do Holoceno e do Pleistoceno tardio (AQUINO et al., 2008). O solo predominante é do tipo arenoso hidromórfico, Glei húmico (COSTA, 2015), composto, em sua maior parte, por areias quartzozas e sedimentos depositados pelos rios Javaés e Araguaia (AQUINO et al., 2008; LATRUBESSE; STEVAUX, 2002).

Em termos climáticos, a região apresenta clima do tipo úmido-subúmido, com moderada deficiência hídrica de maio a setembro (Figura 1.8). Os níveis de precipitação oscilam entre 1.300 e 1.900 mm.ano<sup>-1</sup>, e a temperatura média anual do ar varia de 25 a 26°C. Entre fevereiro e maio, a região é afetada por inundações anuais, as quais, de acordo com os critérios de Junk et al. (2013) são do tipo monomodal, de longa duração (5 meses) e baixa amplitude. Durante o alagamento, o nível da água se eleva de 1 a 5 m acima da superfície do terreno (BORMA et al., 2009; COSTA, 2015; TOCANTINS, 2016). O período seco ocorre de maio a setembro, quando a umidade relativa do ar atinge cerca de 40%. O período chuvoso ocorre de outubro a abril, com umidade relativa média da ordem de 85%. Cerca de 90% da precipitação anual ocorre durante o período chuvoso, demonstrando a forte sazonalidade do sítio (MARCUSO; GOULARTE, 2013).

No sítio JAV, os menores valores do saldo de radiação (Rn) ocorreram nos meses de abril e maio (293 W.m<sup>-2</sup>), e o maior valor em agosto (372 W.m<sup>-2</sup>) no intervalo amostrado, como mostra a Figura 1.8b. A temperatura média do ar varia entre 25 a 28°C, os valores máximos foram registrados no auge do período seco, em setembro, e os menores em fevereiro, período alagado (Figura 1.8c).

No final do período alagado (Figura 1.8d), a umidade do solo diminui rapidamente, entre junho e julho e, diminuindo gradativamente até setembro, final da seca (Figura 1.8e).

Figura 1.8 - Variáveis hidroclimáticas médias mensais registradas no sítio JAV, para o período de outubro de 2004 a setembro de 2015. a) Precipitação média mensal ( $P_{\text{média}}$ ); b) Evapotranspiração total média mensal estimada ( $ET_{\text{média}}$ ) e saldo de radiação médio mensal ( $Rn_{\text{média}}$ ); c) Temperatura média mensal do ar ( $Ta_{\text{média}}$ ); d) Cota do alagamento registrada na base da torre micrometeorológica; e) Umidade volumétrica média mensal do solo ( $\theta$ ) em cinco profundidades (20 cm, 40 cm, 80 cm, 150 cm, e 293 cm)



Fonte: Adaptado de Costa (2015).

Baseado nas características hidrológicas e vegetacionais, Junk (1993) refere-se a esta região como cerrado sazonalmente alagável. Rocha et al. (2009) destacam que embora o sítio esteja localizado em uma área de transição entre a Floresta Amazônica e o Cerrado, o tipo vegetacional não é estritamente ecotonal, mas constituído por fitofisionomias do Cerrado relacionadas com o nível topográfico e à profundidade do aquífero.

Os tipos vegetacionais presentes no sítio são: (1) Floresta Estacional semidecídua (conhecida como mata de torrão) e Cerradão, composta de árvores com altura média aproximada de 20 m e arbustos esparsos que cobrem as áreas mais altas do relevo, as quais alagam somente durante os anos de cheia extrema; (2) Cerrado *stricto sensu*, composto por árvores com cerca de 5 m de altura, em média, e sub-bosque denso, que cobrem as áreas de relevo intermediário; (3) Florestas sazonalmente alagáveis, com ocorrência nas partes mais baixas do relevo, onde o nível do lençol freático é muito raso, e (4) pântanos (conhecidos como varjão), prados naturais com alto nível de nutrientes depositados principalmente durante o alagamento (ROCHA et al., 2009; TOCANTINS, 2016).

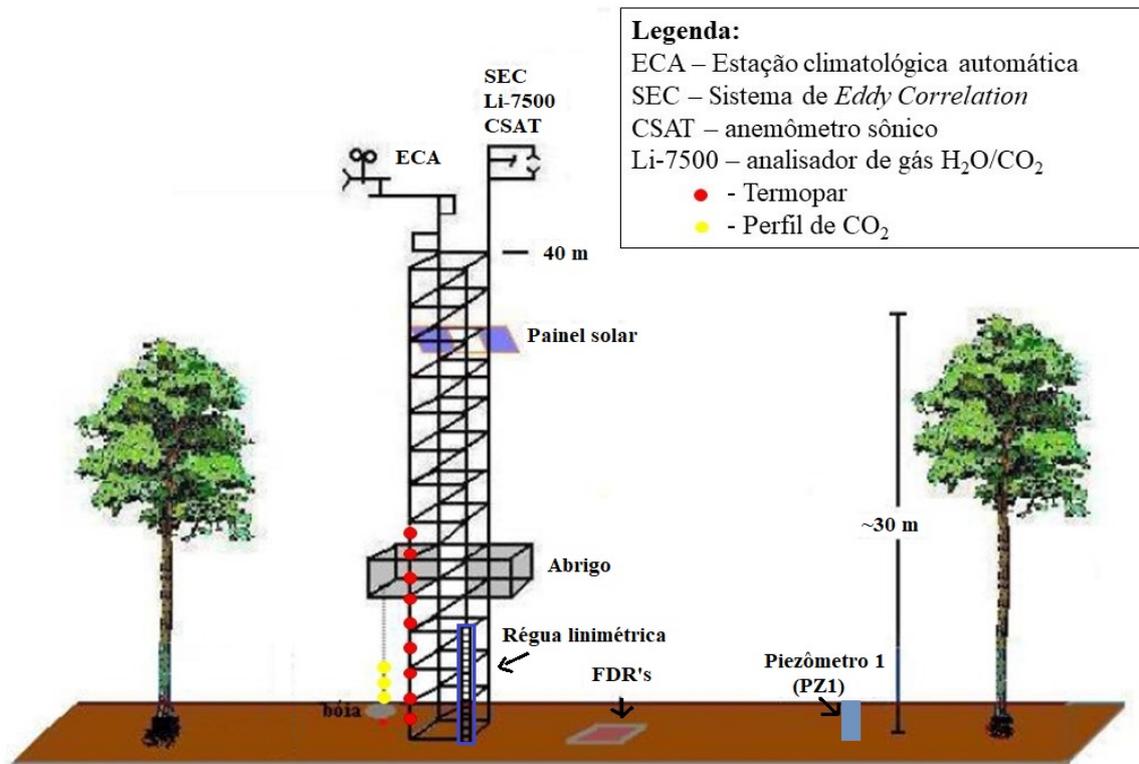
### 1.3.1 Equipamentos instalados no sítio JAV

O sítio conta uma torre micrometeorológica instalada em 2003, por pesquisadores do Laboratório de Clima e Biosfera da IAG/USP, em parceria com a equipe do prof. A. C. Lola da Costa (Universidade Federal do Pará), Instituto Ecológica, Universidade Federal do Tocantins-UFT e Universidade Estadual do Tocantins-UNITINS. A torre consiste de uma estrutura vazada retangular de 42 m de altura, com escadas e plataformas de ferro galvanizado, com seção horizontal de 1 x 2 m, localizada a aproximadamente 2 km a leste do Rio Araguaia, nas coordenadas geográficas 09°49'16,1"S; 50°08'55,3"O, a 120 m de altitude (OLIVEIRA, 2006).

#### 1.3.1.1 Torre micrometeorológica

Na torre foram instalados equipamentos (Figura 1.9) para medidas micrometeorológicas que permitem o monitoramento diário das seguintes variáveis ambientais: fluxos turbulentos de superfície (vapor d'água, dióxido de carbono e metano), fluxo não turbulento de dióxido de carbono, fluxos de radiação (como radiação solar global incidente, refletida, radiação fotossintética ativa e saldo de radiação), e variáveis meteorológicas (temperatura, umidade relativa do ar, precipitação pluviométrica, direção e velocidade do vento). Mais detalhes da instrumentação podem ser consultados nos trabalhos de Costa (2015) e Oliveira (2006).

Figura 1.9 - Desenho esquemático da torre micrometeorológica e equipamentos instalados no entorno

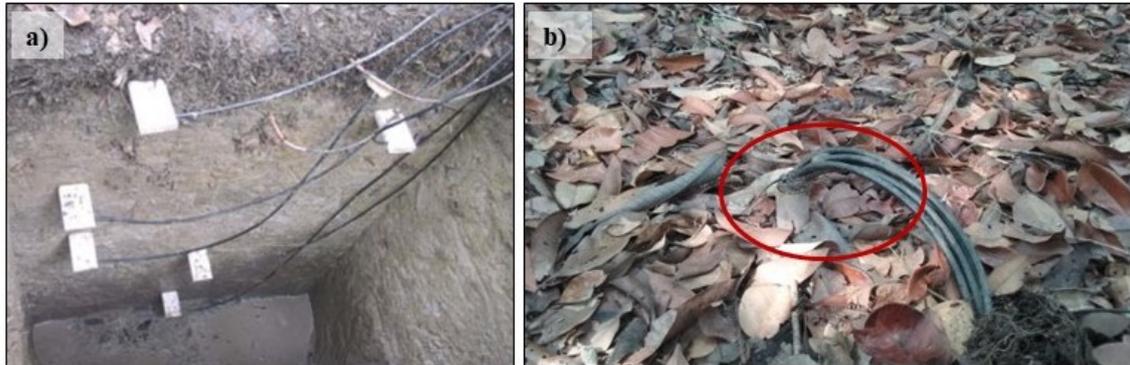


Fonte: Adaptado de Oliveira (2006).

### 1.3.1.2 Monitoramento da umidade volumétrica do solo

Na base da torre, foram instalados refletômetros FDR para monitorar a umidade volumétrica diária do solo nas seguintes profundidades: 20; 40; 80; 150 e 290 cm (Figura 1.10). Os dados de umidade volumétrica do solo foram estimados utilizando uma calibração polinomial de solos arenosos sob uma área de cerrado brasileiro (BORMA et al., 2009; ROCHA et al., 2009).

Figura 1.10 - Refletômetros do tipo FDR instalados para monitorar a umidade do solo em diferentes profundidades na base da torre micrometeorológica, sítio JAV, Tocantins, Brasil. a) Sondas instaladas no perfil do solo; b) Vista do local após a instalação dos equipamentos



Fonte: Oliveira (2006) e Tavares (2015).

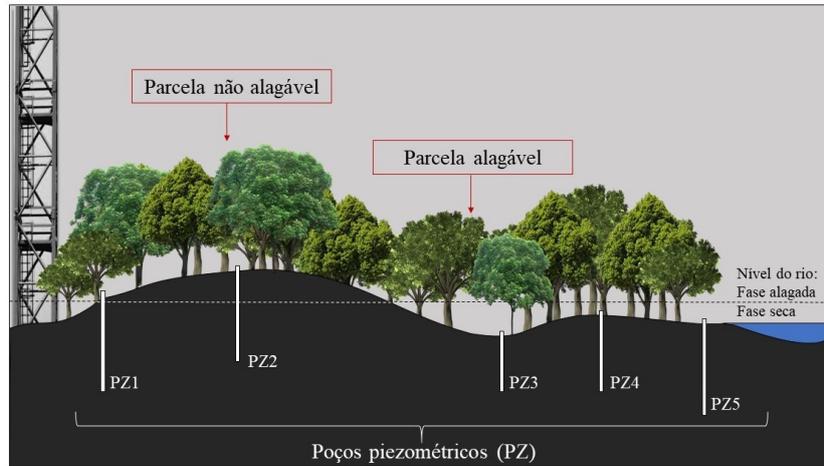
### 1.3.1.3 Monitoramento da cota de alagamento e nível da água subterrânea

Uma régua manual de cota hidrológica (régua linimétrica) foi instalada na base da torre para medir a variação mensal do nível da água durante o alagamento, como mostra a Figura 1.9. Essa régua foi utilizada como referência para representar a cota de alagamento em todo o sítio.

O sítio também conta com 5 poços piezométricos (PZ1, PZ2, PZ3, Pz4 e PZ5) construídos com tubos plásticos de PVC (5 cm de diâmetro e 5,0 m de comprimento), instalados ao longo de um transecto de cerca de 1,1 km de comprimento, partindo da base da torre em direção ao corpo hídrico (sentido leste), conforme esquema apresentado na Figura 1.11. Poço piezométrico é um poço ou equipamento de observação no qual é medido o nível do lençol freático ou a altura piezométrica.

Os poços de monitoramento PZ2 (situado em ambiente de floresta semidecidual), PZ1 e PZ4 (ambos localizados na transição de floresta estacional semidecídua e Cerrado) foram instalados, respectivamente, a 1,69 m, 0,99 m e 0,42 m acima da altura base da torre, enquanto PZ3 e PZ5 (ambos sob a vegetação de savana) estavam, respectivamente, a 0,11 m e 0,35 m abaixo da altura da base da torre.

Figura 1.11 - Transecto dos poços piezométricos no período alagado e no período seco, sítio JAV, Tocantins, Brasil

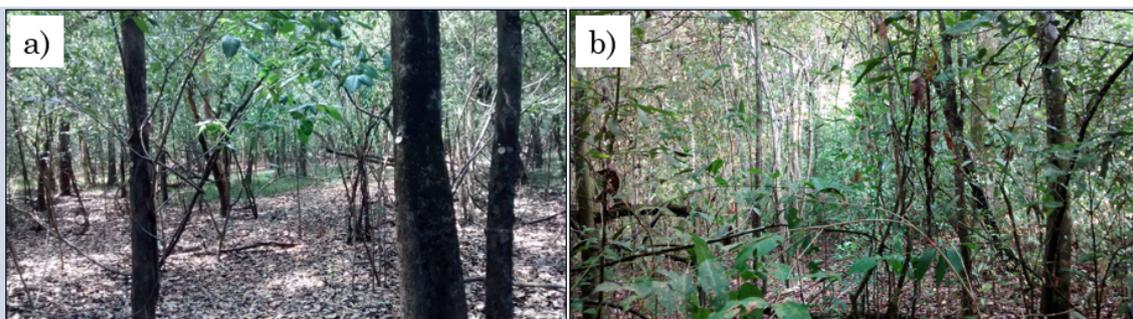


Fonte: Adaptado de Borma et al. (2009).

#### 1.3.1.4 Parcelas experimentais e monitoramento do crescimento radial do tronco

Foram delimitadas duas parcelas experimentais permanentes em 2013, com 100 x 100 m cada. Uma delas localiza-se próxima ao PZ3 (Figuras 1.11 e 1.12), em uma zona de depressão do terreno, ficando totalmente alagada no período de alagamento (daqui para frente denominada parcela sazonalmente alagável ou parcela Alag). A outra localiza-se em uma zona mais elevada do terreno, próxima ao PZ2, e onde, em geral não ocorre o alagamento (denominada parcela não alagável ou parcela N-alag).

Figura 1.12 - Parcelas experimentais instaladas no sítio JAV. a) Parcela sazonalmente alagável; b) Parcela não alagável



Fonte: Produção do autor.

O número de árvores registradas na parcela Alag foi de: 746 árvores, com diâmetro na altura do peito (DAP)  $\geq 10$  cm; e 591 árvores na parcela N-alag. Ainda em 2013, foram registradas as dimensões das árvores, como altura, diâmetro do tronco e, estimado a área basal. Em cada parcela, 100 árvores foram equipadas com dendrômetros manuais para monitoramento do crescimento do tronco, perfazendo um total de 200 árvores com dendrômetros no sítio JAV (Figura 1.13). Após a realização da primeira medida do DAP das árvores, o monitoramento do crescimento foi interrompido devido limitações orçamentárias.

Figura 1.13 - Dendrômetro manual instalados na parcela sazonalmente alagável e na parcela não alagável



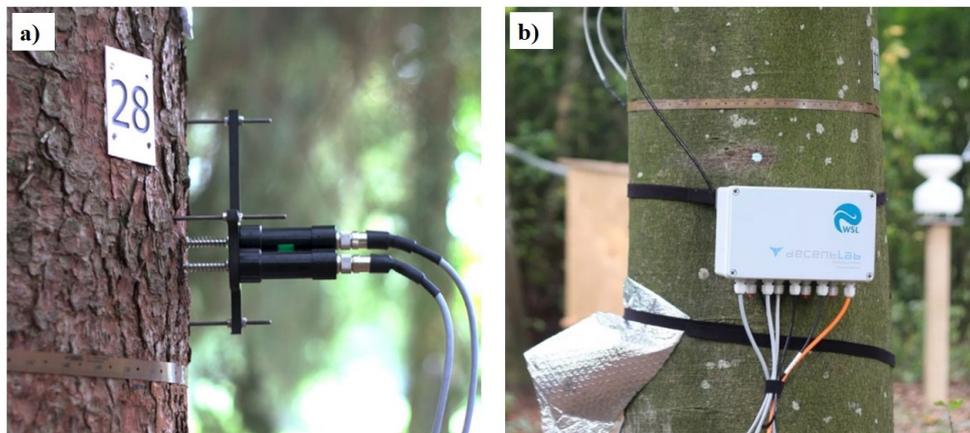
Fonte: Produção do autor.

O monitoramento do crescimento do tronco nas parcelas experimentais foi retomado entre novembro de 2015 e setembro de 2017. Nesse período, 32 árvores (sendo 16 por parcelas) foram excluídas das avaliações devido mortalidade das árvores ou danos nos dendrômetros causados pelo ataque de cupins. Assim, permaneceram no estudo 84 árvores de cada parcela, resultando em um total de 168 árvores.

O monitoramento do crescimento do tronco na parcela Alag ficou suspenso no pe-

ríodo alagado de 2016 e 2017 porque a inundação impedia o acesso pelos operadores. Para atenuar essa limita o, optou-se pela instala o de dendrômetro automáticos (Figura 1.14) nessas áreas alagáveis em maio de 2016, uma vez que dispensava a presença de um operador. Por isso, foram instalados 7 dendrômetros automáticos no entorno da torre micrometeorológica, sendo 5 equipamentos em árvores localizadas em ambiente alagável e outros 2 em árvores localizadas em ambiente isento de alagamento.

Figura 1.14 - Modelo de um dendrômetro automático (A) com o respectivo sistema central de coleta de dados (B) instalado no sítio JAV



Fonte: Decentlab-GmbH (2018).

O dendrômetro automático mede as mudanças no raio dos troncos, por meio de um sensor de alta precisão capaz de detectar aumento ou redu o relacionados à água em uma resolu o temporal de minutos, e detecta o crescimento do tronco ao longo do ano. Os dendrômetros foram alimentados com uma fonte de energia estabilizada de 3 a 5 Vcc. Os dendrômetros registrava os dados e transmitiam por meio de uma rede sem fio (*wireless network*) para uma esta o base (*base station*). Os dados medidos foram transferidos em tempo real para um banco de dados acessível por meio de um navegador da web.

Os dendrômetros automáticos não foram instalados nas parcelas experimentais porque a *base station* precisava um fornecimento contínuo de energia, disponível apenas na torre micrometeorológica e, a distância das parcelas até a torre excedeu a capacidade de transmissão dos equipamentos (*dendrômetro-base station*).



## 2 PADRÃO DE CRESCIMENTO DO TRONCO DAS ÁRVORES LOCALIZADAS EM UMA FLORESTA SAZONALMENTE ALAGÁVEL DURANTE ANOS SECOS

### 2.1 Introdução

As florestas sazonalmente inundadas são amplamente reconhecidas pelos serviços ecossistêmicos que fornecem, desempenhando um papel importante nos serviços de regulação hídrica e climática (JUNK et al., 2013; MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005). Do ponto de vista de regulação hídrica, controlam e atenuam as inundações, retêm nutrientes e o fluxo de sedimentos para os rios, purificam a água, estabilizam as encostas dos rios e recarregam os corpos hídricos [i.e. Costanza et al. (1997), Junk et al. (2013), Mitsch e Gosselink (2015), Nilsson e Renofalt (2008)]. Do ponto de vista da regulação climática, estas florestas também cumprem um papel vital no processo de adaptação e mitigação das mudanças climáticas, uma vez que muitos desses ambientes atuam como reservatórios de carbono (BLOOM et al., 2012; PANGALA et al., 2017; SCHÖNGART et al., 2004).

Apesar de sua importância, estas florestas vêm sofrendo com os processos de mudança no uso e cobertura da terra que, direta ou indiretamente, afetam o nível da água dos rios. Mudanças diretas ocorrem através da drenagem de áreas sazonalmente inundadas com propósito de uso da terra (MCCAULEY et al., 2015), enquanto mudanças indiretas afetam a cota de inundação, em geral pelo uso de água ou construção de barragem a montante (LOBO et al., 2019; RESENDE et al., 2019). Além disso, as mudanças climáticas também podem afetar essas áreas (MALHI et al., 2009; PIEDADE et al., 2013; SCHÖNGART et al., 2004) aumentando a frequência e intensidade de eventos extremos de seca e cheias (GLOOR et al., 2015).

A seca de 2015/16 foi marcada por um aquecimento sem precedentes, em comparação com os fortes eventos de ENSO ocorridos em 1982/83 e 1997/98 (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016; YANG et al., 2018). O ano de 2015 foi apontado como o ano mais quente para a Amazônia desde 1900 – onde se registrava 1,5°C a mais do que durante os eventos do El Niño em 1997/98, e por maior extensão das áreas afetadas na Amazônia, cerca de 20% maior que as demais (1982/83 e 1997/98) (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016). Os mesmos autores apontaram que os impactos da seca de 2015/16 nos ecossistemas de florestas tropicais devem ser relatados e provavelmente serão diferentes dos eventos anteriores de ENSO.

O conhecimento dos impactos e efeitos da seca extrema nas áreas sazonalmente ala-

gáveis ainda é pouco compreendido, embora alguns estudos investigaram a resposta de espécies arbóreas a inundações sazonais e extremas (PAROLIN, 2010; PAROLIN et al., 2010; SCHÖNGART et al., 2002; SCHÖNGART et al., 2004). Em geral, a precipitação diminui cerca de 35% a 50% durante eventos ENSO (MARENGO et al., 2008a; MARENGO et al., 2008b), afetando as inundações e estendendo a fase seca nas florestas sazonalmente alagáveis nas várzea da Amazônia em comparação com anos climáticos não-atípicos (ADIS; LATIF, 1996; SCHÖNGART et al., 2004; SCHÖNGART; JUNK, 2007).

Alguns trabalhos realizados nas florestas de terra firme da Amazônia mostraram que o crescimento das árvores responde negativamente a secas severas, como as ocorridas em 2005 e 2010 ou em experimentos de seca induzida, aumentando a mortalidade e reduzindo a assimilação de carbono (NEPSTAD et al., 2007; PHILLIPS et al., 2009; SAATCHI et al., 2013; WILLIAMSON et al., 2000).

No entanto, estudos focados na resposta de florestas sazonalmente inundadas a eventos extremos são raros. Estudos de ecofisiologia na Amazônia Central indicaram que as várzea alta podem sofrer impactos semelhantes aos relatados para as florestas de terra firme durante secas severas (PIEIDADE et al., 2013), porque são sujeitas a inundações irregulares, que dura um curto período de tempo (WITTMANN et al., 2002), exibindo uma diminuição na fotossíntese, na produtividade e na mortalidade de árvores (FOLEY et al., 2002; PHILLIPS et al., 2009; PRENTICE; LLOYD, 1998; TIAN et al., 1998).

Por outro lado, o crescimento das árvores nas várzea baixa são beneficiadas pela redução da duração e extensão da área inundada (SCHÖNGART et al., 2002; SCHÖNGART et al., 2004). Assim, a fase seca prolongada que ocorre em anos secos foi considerada favorável para a maioria das árvores, uma vez que seu estabelecimento, crescimento radial e altura ocorrem principalmente durante esta fase (PARENT et al., 2008; SCHÖNGART et al., 2002; WORBES, 1989). Considerando a variação do funcionamento das várzeas, alguns estudos destacaram que as generalizações sobre a resposta das florestas sazonais da Amazônia a eventos extremos podem ser arriscadas (SCHÖNGART et al., 2010; PIEIDADE et al., 2013).

A maioria dos estudos nas florestas sazonalmente alagáveis da Amazônia foi realizado na região central da bacia Amazônica, porém existem outras florestas alagáveis que merecem a mesma atenção como a situada no curso médio do rio Araguaia (planície aluvial do Araguaia), uma área de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado (TOCANTINS, 2016). Alguns estudos realizados nessa floresta relataram um potencial

estresse hídrico para as plantas ocorrendo em dois períodos do ano, durante as inundações e no pico do período seco (BORMA et al., 2009; COSTA, 2015; FONSECA et al., 2019; KURZATKOWSKI et al., 2015; ROCHA et al., 2009).

No presente estudo, pretendem-se investigar 1) como as variações altimétricas (áreas altas e baixas) e as condições hidroclimáticas na planície aluvial do Araguaia influenciam no crescimento do tronco das árvores? 2) e qual é o padrão de crescimento intra-anual da floresta em um ano marcado por uma seca extrema? Para responder a essas perguntas, analisou-se os dados de crescimento do tronco associados à condições hidroclimática ao longo de dois anos hidrológicos, incluindo a seca extrema de 2015/16.

Espera-se que as árvores que crescem nas áreas mais altas, isentas de alagamento, apresentam crescimento mais reduzido no período seco, enquanto as árvores que crescem nas partes mais baixas sejam mais afetadas pelas cheias do rio. Espera-se também que grupos específicos de tamanhos de árvores (DAP) influenciem no padrão sazonal do crescimento do tronco, como ocorre nas florestas de terra firme (SILVA et al., 2003).

## 2.2 Material e métodos

### 2.2.1 Sítio experimental

Este trabalho foi realizado no sítio experimental Javaésinho (JAV), uma área sazonalmente alagável do Parque Estadual do Cantão (PEC), localizada no município de Pium, estado do Tocantins, Brasil (Figura 1.7). O sítio JAV pertence a um dos sítios do Programa Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera da Amazônia (LBA, do inglês, *Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*), equipado com uma torre micrometeorológica (coordenadas: -09°49'16,1"S; -50°08'55,3"O), e outros instrumentos de medição das condições hidroclimáticas, conforme apresentado no item 1.3.1.

A área de estudo localizada na transição entre os biomas Amazônia e Cerrado, delimitada no sudoeste pela região da Ilha do Bananal, que é a maior ilha fluvial do mundo. Esse ambiente é constituído por um complexo mosaico de unidades morfo-sedimentares formado por sedimentos do Holoceno e do Pleistoceno tardio (AQUINO et al., 2008).

A região apresenta clima do tipo úmido-subúmido, "Aw" na classificação climática de Köppen. A precipitação anual normalmente varia entre 1300 e 1900 mm, e a tempe-

ratura varia de 25 a 26°C (COSTA, 2015). O período seco ocorre de maio a setembro, e o período chuvoso de outubro a abril. Nesse último concentra aproximadamente 90% da precipitação anual (MARCUIZZO; GOULARTE, 2013).

Entre fevereiro e maio, devido à associação entre elevada pluviosidade e ocorrência de planície aluvionar, a região é afetada por inundações anuais, do tipo monomodal previsível, de longa duração (5 meses) e baixa amplitude (JUNK et al., 2013). Durante o alagamento, o nível da água se eleva de 1 a 5 m acima da superfície do terreno (BORMA et al., 2009; COSTA, 2015; TOCANTINS, 2016).

A topografia local é plana e o tipo de solo predominante é glei húmico (BORMA et al., 2009), composto, em sua maior parte, por neossolos quartzarênicos e sedimentos depositados pelos rios Javaés e Araguaia (AQUINO et al., 2008; LATRUBESSE; STEVAUX, 2002).

### **2.2.2 Coleta de dados e estratégia experimental**

A presente pesquisa foi realizada no entorno da torre micrometeorológica e em duas parcelas experimentais, de 100 x 100 m. Uma das parcelas está localizada em (1) área sazonalmente alagada (parcela Alag) e (2) outra parcela está situada em uma área não alagável (parcela N-alag), como mostra a Figura 1.12.

Neste trabalho relacionou-se os fatores ambientais, como precipitação, temperatura do ar, déficit de pressão de vapor (VPD), altura do alagamento, variação da cota do lençol freático, umidade volumétrica do solo e as condições topografia (variação na cota altimétrica entre parcelas), com a resposta das árvores, aqui representada pela variação do diâmetro do tronco.

Parte dos dados dos fatores ambientais foram obtidos no sítio JAV, utilizando a instrumentação disponível na torre micrometeorológica (torre JAV) e no entorno, outra parte foram obtidas de produtos de sensoriamento remoto, reanálise e dados observacionais (precipitação e VPD) e estação meteorológica mais próxima (temperatura do ar), para representar as condições hidroclimáticas do período observado. O uso desses produtos ocorreu devido falhas no monitoramento das variáveis pela torre micrometeorológica durante o período observado, de outubro de 2015 a setembro de 2017.

Os dados de crescimento do tronco foram obtidas de árvores com dendrômetros manuais, localizadas em duas parcelas experimentais e, árvores com dendrômetros automáticos localizadas no entorno da torre. A Tabela 2.1 apresenta uma síntese

dos dados coletados, período considerado, e fontes acessadas.

Tabela 2.1 - Dados coletados com as respectivas unidades, período de coleta e base de dados consultado, sítio JAV

| Variáveis                                       | Registro | Período              | Fonte dos dados/<br>equipamentos              |
|---|----------|----------------------|---|
| Precipitação (P)                                | Obs      | out/2015 a set/2017  | TRMM <sup>a</sup>                             |
|   | Média    | out/2004 a set/2015  | TRMM <sup>a</sup> e torre JAV <sup>b</sup>    |
| Temperatura média do ar (Ta)                    | Obs      | out/2015 a set/2017  | torre JAV <sup>b</sup> e INMET <sup>c</sup>   |
|   | Média    | jan/2013 a ago/2015  |   |
| Déficit de pressão de vapor (VPD)               | Obs      | out/2015 a set/2017  | ERA5 <sup>d</sup>                             |
|   | Média    | out/2004 a set/2015  | torre JAV <sup>d</sup> e ERA5 <sup>d</sup>    |
| Cota do alagamento                              | Obs      | nov/2015 a set/2017  | entorno da torre JAV                          |
|   | Média    | out/2004 a set/2015  |   |
| Cota do lençol freático                         | Obs      | nov/2015 a set/2017  |   |
| Umidade do solo ( $\theta$ )                    | Obs      | nov/2015 a out/2016  |   |
|   | Média    | out/2004 a set/2015  |   |
| Incremento acumulado do diâmetro do tronco (IA) | Obs      | jun/2016 a maio/2017 |   |
|   | Obs      | nov/2015 a set/2017  | parcelas Alag e N-alag/<br>dendrômetro manual |
|   | Média    | nov/2013 e nov/2015  | parcelas Alag e N-alag/<br>dendrômetro manual |

Obs - Período observado; Média - média calculada para o período. <sup>a</sup>Huffman et al. (2017); <sup>b</sup>Universidade de São Paulo (2017); <sup>c</sup>Instituto Nacional de Meteorologia (2017); <sup>d</sup>Fonseca et al. (2019).

Fonte: Produção do autor.

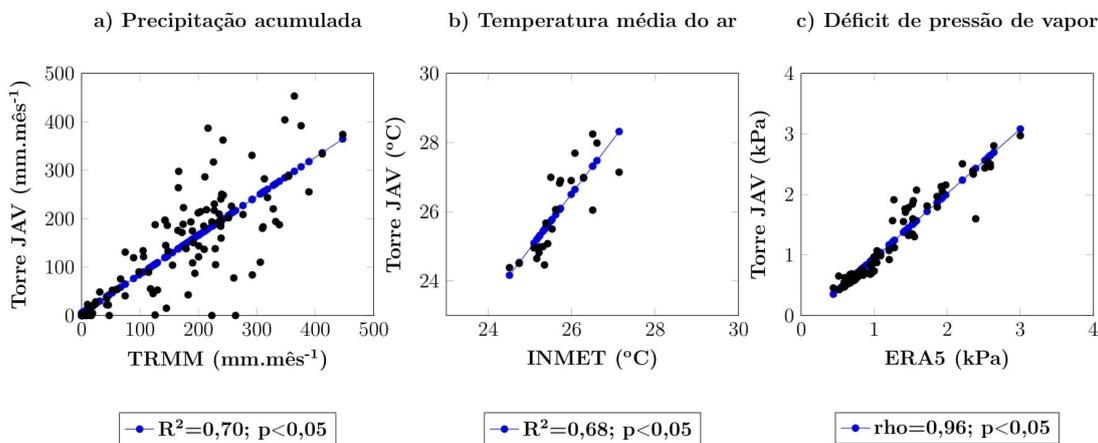
O período de referência escolhido para representar a média, out./2004 a set./2015, compreendeu todos os anos hidrológicos com dados hidroclimáticos registrados no sítio JAV, desde sua instalação. Apenas para o INMET, o cálculo da média foi baseado no período de janeiro/2013 a agosto/2015, tendo em vista o início de operação da estação de Marianópolis.

Optou-se por excluir os anos 2015/16 e 2016/17 do cálculo da média de longo prazo, tendo em vista o fato de que esses anos foram atípicamente secos, em decorrência de uma forte seca causada por El Niño que afetou a Amazônia como um todo, e foi considerada como a mais severa, desde o evento de 1998 (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016). A não inclusão dos dados desses anos na série de dados disponíveis teve por objetivo uma melhor avaliação dos reais impactos dessa seca no sítio em estudo.

A Tabela 2.1 indica a utilização de duas bases de dados distintas para representação das variáveis precipitação, temperatura média do ar e VPD. Para investigar a variação da precipitação no sítio JAV utilizou-se: dados registrados na torre micrometeorológica do sítio JAV (torre JAV), e dados do produto 3B43 versão 3 do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), operado pela *National Aeronautics and Space Administration* - NASA. Este produto possui resolução espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  (aproximadamente 25 km no Equador) e combina vários sensores a bordo do TRMM, como os sensores *Microwave Imager*, *Precipitation Radar*, e *Visible and Infrared Scanner*, além de estações pluviométricas a superfície (HUFFMAN et al., 2017).

Os dados de precipitação medidos na torre JAV no período observado não foram utilizados devido a lacunas nos registros nesses registros. Por isso, essa fonte foi utilizada apenas como referência para validar os dados do TRMM. A Figura 2.1 mostra que os dados do TRMM apresentaram uma correlação significativa com as medidas de torre de 2004 a 2015 ( $R^2 = 0,70$ ,  $p < 0,05$ ).

Figura 2.1 - Análise de correlação entre as bases de dados utilizadas para as variáveis precipitação, temperatura média do ar, e déficit de pressão de vapor



Linha pontilhada na cor azul representa a linha de tendência. Os dados de precipitação acumulada mensal (a) foram monitoradas pela torre micrometeorológica do sítio JAV (Torre JAV) e pelo *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), enquanto os dados de déficit de pressão de vapor (c) foram obtidos pela Torre JAV e pelo ERA5, sendo ambos calculados para o período de 2004 a 2015. Os dados de temperatura média do ar (b) foram monitoradas pela torre e pelo Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET), de 2013 a 2015.

Fonte: Produção do autor.

Os dados de temperatura média do ar foram obtidos pela torre micrometeorológica do sítio, e disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), estação meteorológica automática de Marianópolis no Estado do Tocantins (coordenadas:-09°34'35"S; -49°43'24"O).

Os dados de VPD foram obtidos pelos produtos do ERA5. O ERA5 é um conjunto de dados de reanálise climática, desenvolvido pelo Copernicus Climate Change Service (COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE, 2019). O processamento dos dados para o ERA5 foi realizado pelo ECMWF, usando o modelo de sistema terrestre IFS do ECMWF, ciclo 41r2. O nome ERA refere-se a “ECMWF ReAnalysis”, com o ERA5 sendo a quinta principal reanálise global produzida pelo ECMWF (após FGGE, ERA-15, ERA-40, ERA-Interim). A resolução temporal para os dados do conjunto foi de 3 horas. Os dados do ERA5 para a região do sítio JAV foram organizados e disponibilizados por Fonseca et al. (2019).

Os dados de temperatura média do ar e VPD, do INMET e ERA5, respectivamente, apresentaram uma correlação muito alta (Ta:  $R^2 = 0,68$  e  $p < 0,05$ ; VPD:  $\rho = 0,96$  e  $p < 0,05$ ) com dados de torre, como mostram as Figuras 2.1b e 2.1c.

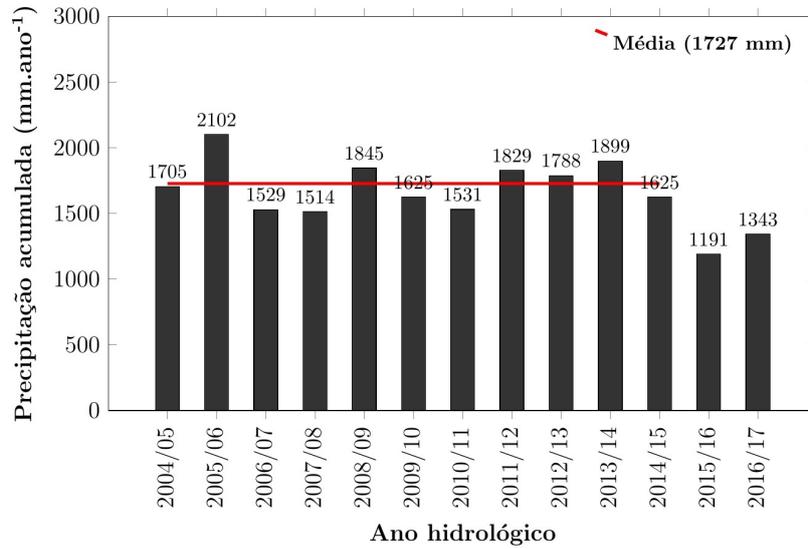
### 2.2.2.1 Dados hidroclimáticos

Previamente, foi analisado dados de precipitação anual acumulada em 11 anos hidrológicos, para identificar os anos mais secos da série temporal (2004-2015), como mostra a Figura 2.2. Cada ano hidrológico foi delimitado com início em 01 de outubro e término em 30 de setembro do ano seguinte.

Os dois anos mais secos foram 2015/16 (1.191 mm.ano<sup>-1</sup>; ↓31%) e 2016/17 (1.343 mm.ano<sup>-1</sup>; ↓22,23%), comparado com a média (1.727 mm.ano<sup>-1</sup>) como aponta a Figura 2.2, o que pode implicar na diminuição da altura e duração das inundações. Considerando essa condição, os anos hidrológicos 2015/16 e 2016/17 foram selecionados para representar os mais secos da série. Assim, comparou-se os dados de precipitação desses anos com a dos anos não atípicos (não-ENSO), 2004/05 a 2014/15 (Tabela 2.1). A mesma referência foi adotada para a análise do VPD.

A temperatura do ar dos anos mais secos foi comparada com os anos de 2012/13 (início da operação da Estação Meteorológica de Marianópolis) até 2014/15.

Figura 2.2 - Precipitação acumulada para cada ano hidrológico (de outubro a setembro), região do sítio JAV, Tocantins, Brasil.



Fonte: Produção do autor.

Utilizou-se os mesmos anos de referência da precipitação (anos secos e não-ENSO), para analisar a variação de altura, duração do alagamento e umidade do solo. Essas variáveis foram usadas para representar as condições hidrológicas do sítio JAV.

A umidade volumétrica do solo foi monitorada utilizando-se refletômetros no domínio da frequência (FDR) instalados na base da torre micrometeorológica, nas profundidades de 20, 40, 80, 150 e 293 cm, entre outubro de 2004 a outubro de 2016 (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2017). Os sensores pararam de registrar as medidas entre novembro de 2016 a setembro de 2017, devido falhas no funcionamento.

Os dados foram calibrados usando uma função polinomial obtida para solos argilosos sob área de cerrado e uma função sigmóide, que forneceram os cálculos necessários para determinar os limites inferiores (solo seco) e superiores (saturado) de umidade do solo (solo seco) (ROCHA et al., 2004), como mostra a Tabela 2.2:

$$\theta(\tau) = a[1 + (d - 1) \cdot e^{-k(\tau - \tau_c)}]1 \cdot 1/(1 - d) \quad (2.1)$$

onde  $\theta$  é a umidade volumétrica do solo em m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>;  $\tau$  representa os dados dos refletômetros em MS; e  $\tau_c$ ,  $a$ ,  $d$  e  $k$  são parâmetros dessa equação.

Tabela 2.2 - Parâmetros calculados para a Equação 2.1

| Profundidade<br>(cm) | Valores máximos e mínimos<br>para $\tau$ (MS) e $\theta(\tau)$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) |                             |                     |                             | Parâmetros calculados |          |       |       | Coefficiente<br>de regressão |
|----------------------|---|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------|----------|-------|-------|------------------------------|
|                      | $\tau_{\text{mín}}$   | $\theta(\tau_{\text{mín}})$ | $\tau_{\text{máx}}$ | $\theta(\tau_{\text{máx}})$ | $a$                   | $\tau_c$ | $d$   | $k$   | $R^2$                        |
| 5                    | 0,715   | 0,012                       | 1,275               | 0,445                       | 0,645                 | 0,859    | 0,332 | 2,546 | 0,999                        |
| 55                   | 0,714   | 0,010                       | 1,189               | 0,413                       | 1,148                 | 0,857    | 0,160 | 1,106 | 0,999                        |

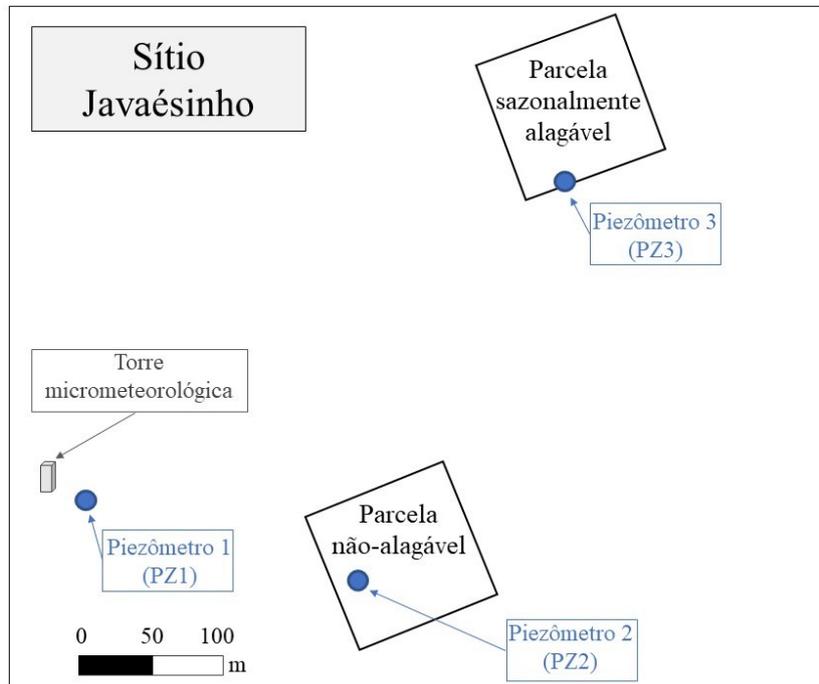
Fonte: Borma et al. (2009).

A porosidade do solo foi estimada como a umidade máxima do solo em cada profundidade observada no período de alagamento (grau de saturação do solo de 100%). Os valores obtidos foram 0,65; 0,59; 0,58 e 0,62  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , para as profundidades de 20, 80, 150 e 293 cm, respectivamente.

A cota de alagamento foi registrada mensalmente por meio da régua linimétrica instalada na base da torre, enquanto a variação do lençol freático foi monitorada em 3 poços piezométricos (PZ1, PZ2 e PZ3), como mostra a Figura 2.3.

Os poços PZ2 (sob área não alagável; parcela N-alag) e PZ1 (área sazonalmente alagável; parcela Torre) foram instalados a 1,69 m e 0,99 m acima da base da torre, respectivamente, enquanto PZ3 (sob área sazonalmente alagável; parcela Alag) foi instalado a 0,11 m abaixo da base da torre. Neste estudo o nível da água foi monitorado apenas nesses poços piezométricos devido a maior proximidade das áreas de interesse (parcelas experimentais).

Figura 2.3 - Representação ilustrativa das distâncias dos poços piezométricos 1 (PZ1), 2 (PZ2) e 3 (PZ3) e das parcelas experimentais em relação a torre micrometeorológica do sítio JAV



Fonte: Produção do autor.

### 2.2.2.2 Levantamento planialtimétrico

Delimitou-se uma linha base de 100 metros e seções transversais, em uma malha de 10 em 10 metros, nas parcelas Alag e N-alag para realizar o levantamento planialtimétrico. A aquisição dos pontos foi obtido a partir de uma estação total eletrônica (TOPCON, modelo GTS-239W), seguido de um apoio geodésico.

O apoio geodésico foi constituído de rastreamento estático de um conjunto de pontos planialtimétrico, para dar suporte ao levantamento topográfico. Os pontos selecionados corresponderam as mesmas localizações dos instrumentos/equipamentos do sítio JAV: os 5 piezômetros (PZ1, PZ2, PZ3, PZ4 e PZ5) e a torre micrometeorológica. A determinação da localização desses pontos foi realizada utilizando um receptor (Topcon GNSS Hiper L1/L2, modelo Hiper L1/L2), com precisão horizontal de 3 mm e precisão vertical de 5 mm.

Os dados coletados foram transferidos para o computador através do software que se comunica com a coletora de dados dos receptores GNSS (Windows Mobile Device

Center). Para os arquivos de estação total utilizou-se o software Colet. Os dados obtidos foram processados (cálculo) e representados em uma carta altimétrica.

### 2.2.2.3 Seleção das árvores e medidas do crescimento do tronco

Em 2015, foram selecionadas 84 árvores equipadas com dendrômetros manuais em cada parcela (Alag e N-alag) para monitorar o crescimento do tronco. O número total de árvores selecionadas foi de 168, sendo todas com DAP maior que 10 cm (Figura 2.4). Nesse período, foram registradas 746 árvores na parcela Alag, e na parcela N-alag 591 árvores, todas com diâmetro na altura do peito (DAP)  $\geq 10$  cm.

Neste trabalho optou-se por investigar o crescimento apenas das 168 árvores devido limitações na estrutura logística, recursos financeiros e, de pessoal para conduzir as medições.

A identificação botânica das árvores com dendrômetros manuais foi realizada por um taxonomista especializado em espécies amazônicas e do cerrado brasileiro, com contribuições de dois mateiros residentes na região.

Figura 2.4 - Registro do crescimento do tronco utilizando dendrômetro manual (fita dendrométrica) e um paquímetro digital



Fonte: Produção do autor.

O crescimento do tronco (incremento) foi monitorado entre outubro de 2013 a setembro de 2017. Junto com a delimitação das parcelas foi realizado a primeira medição, em outubro de 2013. Nos meses seguintes, o monitoramento do crescimento das árvores foram suspensas nas parcelas, sendo retomado apenas em novembro de 2015. As duas medidas realizadas nesse intervalo foram utilizadas para representar

o incremento acumulado médio dos anos sem ocorrência de ENSO (não-ENSO).

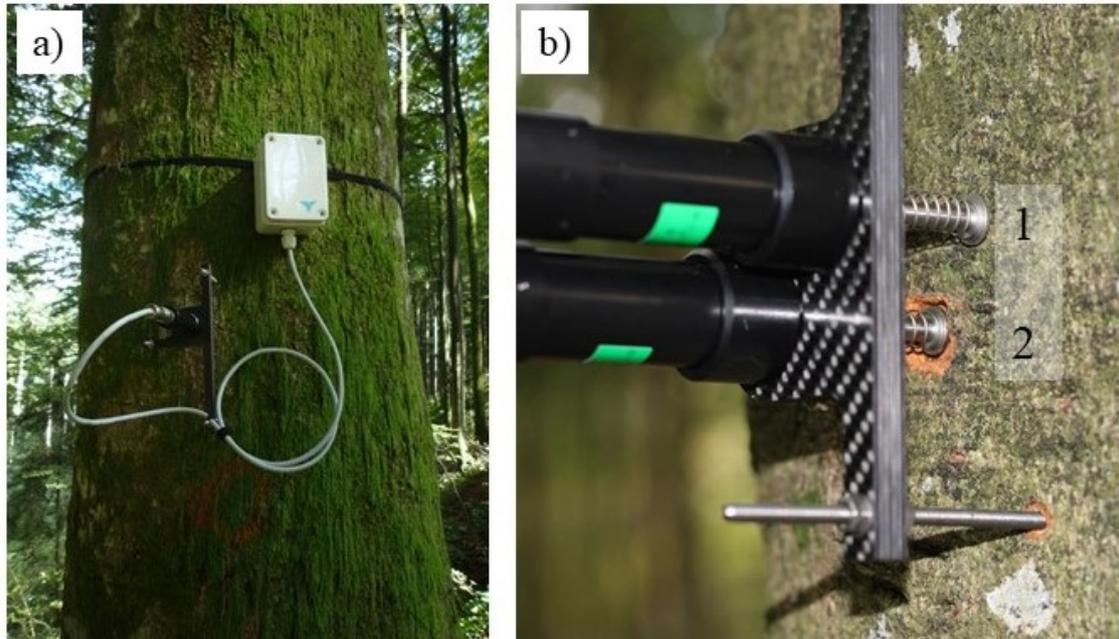
Entre novembro de 2015 a setembro de 2017 foram realizadas 15 (quinze) medidas do diâmetro do tronco nas parcelas experimentais. As medidas realizadas nesse período foram utilizadas para representar o incremento acumulado anual de 2015/16 e 2016/17 e o padrão de crescimento do tronco nos anos secos (2015/16 e 2016/17). O incremento acumulado anual (taxa de crescimento anual) foi comparada entre os anos não-ENSO, e os anos secos.

As medidas do diâmetro do tronco foram realizadas utilizando o método dinâmico (FAHN et al., 1981; SILVA et al., 2003), que consiste em leituras periódicas do aumento da circunferência do tronco registrados nos dendrômetros manuais, utilizando um paquímetro digital com precisão de centésimos de milímetro.

Devido as dificuldades para acessar as árvores parcialmente submersas (parcela Alag) no período alagado, o padrão de crescimento também foi monitorado pelos dendrômetros automáticos (marca Natkon, modelo ZN12-T-2IP), que permite medir incrementos do raio do tronco com resolução inferior a  $1 \mu\text{m}$  (Figura 2.5). Esses dendrômetros dispensou a presença de um operador para realizar as leituras, armazenando e disponibilizando os dados quando o acesso ao local foi favorável.

Os dendrômetros automáticos foram instalados em 7 indivíduos localizados no entorno da torre, sendo 5 indivíduos localizados em ambiente sazonalmente alagável, e 2 em ambiente não alagável.

Figura 2.5 - Dendrômetro automático instalados no sítio JAV. a) Vista frontal do equipamento na árvore; b) Vista lateral com destaque para o posicionamento dos transdutores de deslocamento na casca (1) e no xilema (2)



Fonte: Decentlab-GmbH (2018).

### 2.2.3 Análise dos dados

Os dados hidroclimáticos (precipitação, temperatura, VPD, cota do alagamento, e umidade do solo) dos anos secos (2015/16 e 2016/17), foram comparados com as respectivas médias de longo prazo (Tabela 2.1).

Os dados de incrementos em circunferência obtidos dos dendrômetros manuais e os dados de incremento do raio do tronco obtidos dos dendrômetros automáticos foram transformados em incremento acumulado do diâmetro do tronco (IA). O IA foi calculado a partir da soma dos incrementos registrados em cada leitura.

As médias foram tratadas estatisticamente de forma a se obter: (a) IA médio mensal durante os anos secos (2015/16 e 2016/17); (b) comparação de IA entre parcelas Alag e N-alag; (c) comparação do IA dos anos secos entre classes de diâmetros e parcelas; e (d) comparação do IA anual nos anos secos hidrológicos com os anos não-ENSO.

A relação entre o incremento acumulado do tronco em função do DAP foi feita para três classes de tamanho de tronco (classe A = DAP 10,0 a 19,9 cm; classe B = DAP

20,0 a 29,9 cm; classe C =  $\geq 30,0$  cm), para as parcelas Alag e N-alag como proposto por Silva et al. (2003).

Os dados de incremento acumulado do tronco das parcelas Alag e N-alag também foram comparados com as variáveis climáticas, precipitação, temperatura e VPD durante o período observado.

Os dados foram submetidos ao teste de hipótese para dados não paramétricos (Teste Kruskal Wallis - KW) a 5 % de probabilidade, com comparação de grupos pelo método de Simes-Hochberg (SH), e análise de correlação (IA e variáveis climáticas), utilizando um programa estatístico *Action Stat*, desenvolvido pela Estatcamp - Consultoria Estatística e Qualidade, no Brasil.

## 2.3 Resultados

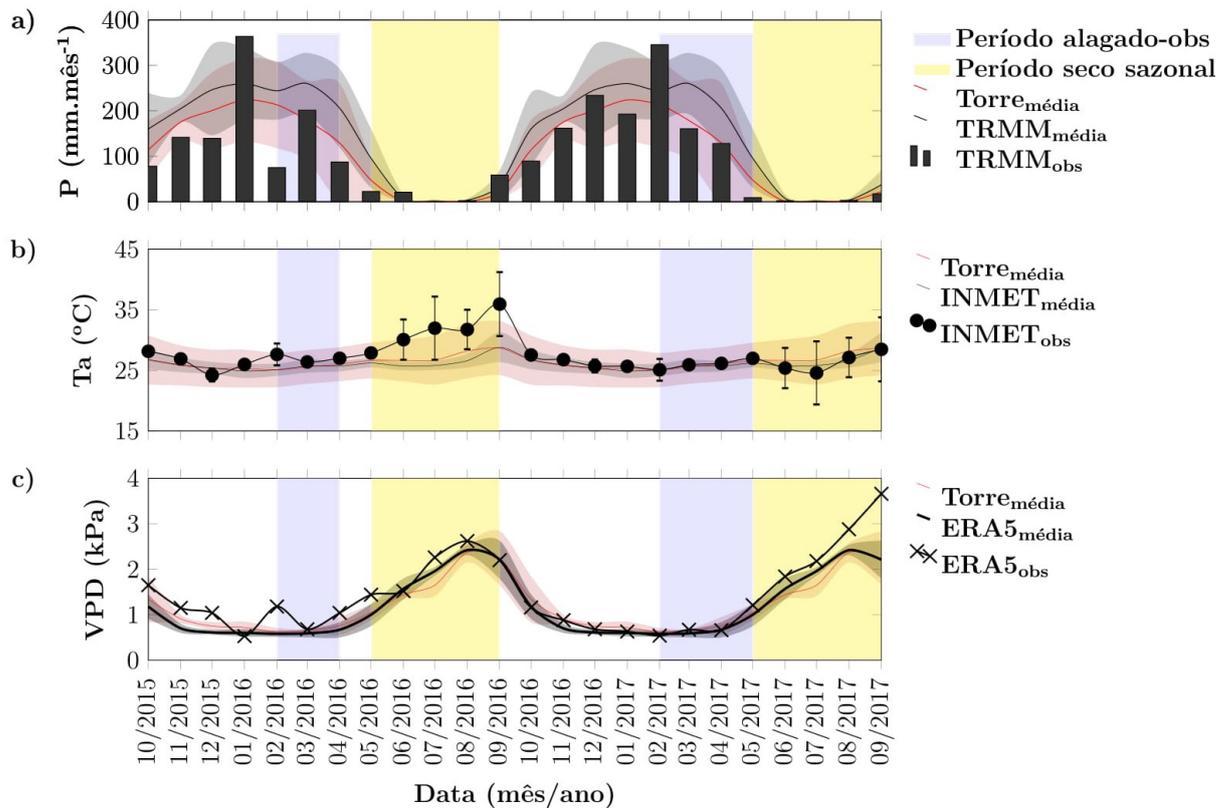
### 2.3.1 Condições hidroclimáticas médias e ambientais

Os valores médios das variáveis climáticas e hidrológicas para o período entre 2004 e 2015 são apresentadas na Figura 2.6. A precipitação mensal máxima (acima de  $100 \text{ mm.mês}^{-1}$ ) ocorre de dezembro a fevereiro e as médias mensais abaixo de  $50 \text{ mm.mês}^{-1}$  são observadas entre junho e setembro (Figura 2.6a).

Apesar da grande variação sazonal na precipitação, a variação sazonal da temperatura média do ar ( $T_a$ ) é baixa nessa região (Figura 2.6b), varia entre 25 a 28°C. Da mesma forma, a variação intra-anual do VPD é baixa (1,8 kPa), os valores mínimos são alcançados em fevereiro (cerca de 0,6 kPa) e os máximos em agosto (cerca de 2,4 kPa).

Nessa região o período alagado dá-se de fevereiro até o final de maio/início de junho, com a altura máxima do nível da água ocorrendo em março/abril (Figura 2.7a). Nota-se a existência de um atraso de cerca de 2 meses entre o nível máximo do alagamento e a precipitação máxima no local (primeiro pico). A cota de alagamento na base da torre varia de 0,7 a 2,7 m, com média de 1,7 m.

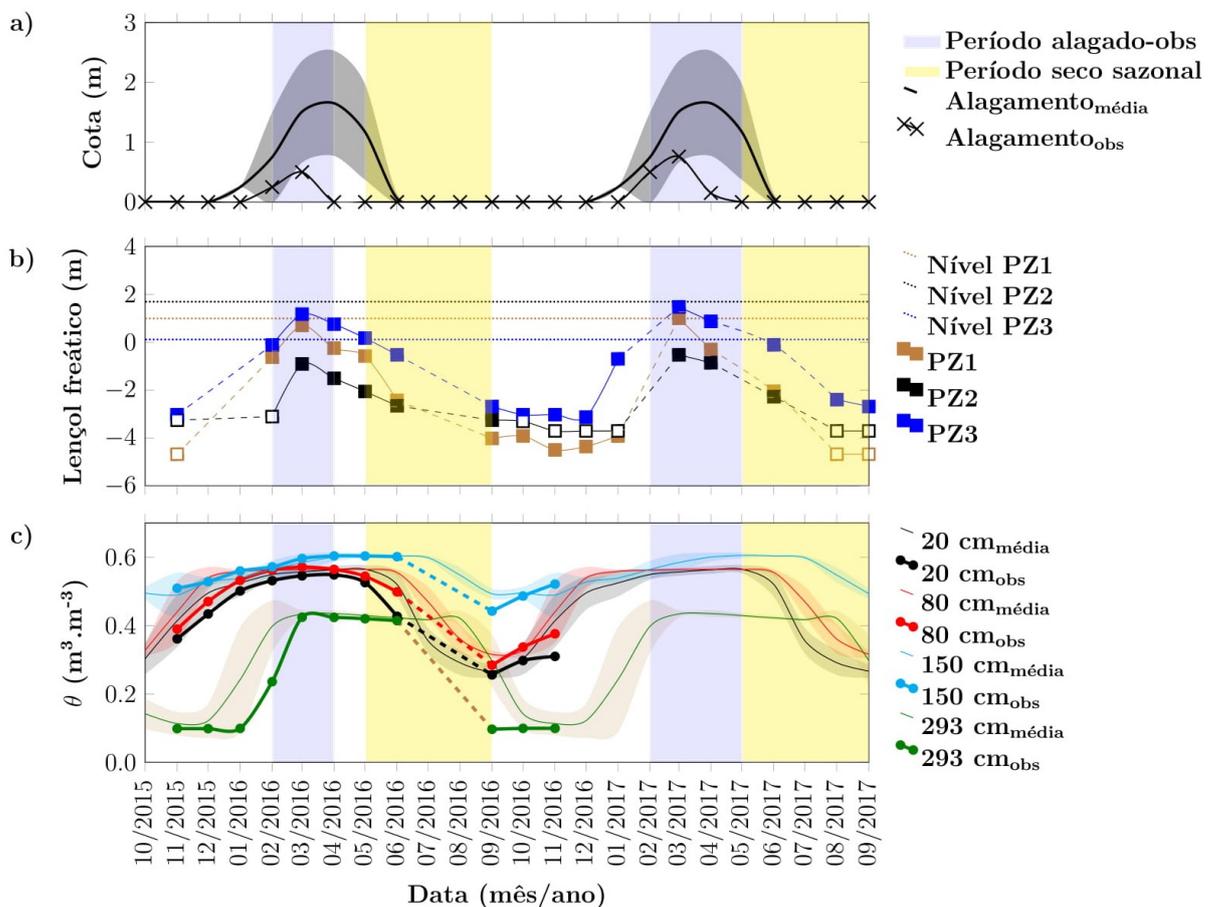
Figura 2.6 - Variáveis climáticas médias mensais no sítio JAV, com base no período de outubro de 2004 a setembro de 2015 (média a longo prazo), e valores observados no período de outubro de 2015 a setembro de 2017. a) Precipitação acumulada mensal obtidas pelo TRMM (barras em cinza e linha sólida preta) e torre JAV (linha sólida vermelha); b) Temperatura média do ar ( $T_a$ ) medidas pelo INMET (linha sólida com círculos pretos e linha preta sólida) e torre JAV (linha sólida vermelha); c) Déficit de pressão de vapor estimadas pelo ERA5 (linha sólida com símbolos pretos e linha preta sólida) e torre JAV (linha sólida vermelha)



O indicativo “obs” nas figuras refere-se ao período observado, e o indicativo “média” representa as médias a longo prazo.

Fonte: Produção do autor.

Figura 2.7 - Variáveis hidrológicas médias mensais e umidade do solo registradas no sítio JAV, com base no período de outubro de 2004 a setembro de 2015 (média a longo prazo), e valores observados no período de outubro de 2015 a setembro de 2017. a) Cota de alagamento registrada na base da torre (linha sólida com símbolos pretos), e cota média mensal (linha preta sólida); b) Cota do lençol freático nos piezômetros 1 (linha contínua com quadrado marrom; PZ1), 2 (linha sólida com quadrado preto; PZ2) e 3 (linha sólida com quadrado azul; PZ3), com os respectivos níveis dos terrenos de cada local (nível PZ1, nível PZ2, e nível PZ3); c) Umidade volumétrica diária mensal do solo nas seguintes profundidades: 20, 80, 150 e 293 cm (descritas como na legenda), com os respectivos valores médios



O indicativo “obs” nas figuras refere-se ao período observado, e o indicativo “média” representa as médias a longo prazo. Referente as Figuras 2.7a e 2.7b, o nível de referência igual a zero é a base da torre. Para a Figura 2.7b, os símbolos quadrados vazios referem-se à ausência de água no piezômetro. As linhas tracejadas destacam a ausência de dados no período avaliado.

Fonte: Produção do autor.

A umidade do solo atinge os valores máximos (saturação) durante o período alagado e os mínimos no final do período seco, correspondendo ao mês de setembro (Figura 2.7b). Após o final do alagamento, a umidade do solo diminui rapidamente entre junho e julho, depois reduz a intensidade gradativamente até setembro. Excepcionalmente para as camadas a 150 cm e 293 cm de profundidade, as respectivas umidades permanecem elevadas até julho (camada a 150 cm) e agosto (camada a 293 cm). A 150 cm de profundidade a saturação do solo começa a ocorrer em novembro, juntamente com as demais profundidades. No entanto, na camada a 293 cm de profundidade a saturação só ocorre em fevereiro. Esses resultados sugerem que as camadas inferiores (150 cm e 293 m) seriam umedecidas pela elevação do lençol freático, que encontra-se a uma profundidade de cerca de 2 m em fevereiro (Figura 2.7c), enquanto as camadas superficiais (20 e 80 cm) são umedecidas pelas chuvas, que começam a ser mais pronunciadas em novembro.

### 2.3.2 Condições hidroclimáticas nos anos secos

Em 2015/16 a região Amazônica foi submetida a uma severa seca (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016). Nesse ano houve uma queda expressiva no volume de precipitações durante o período chuvoso (valores  $\downarrow 31$  % abaixo da média do período) na região do sítio JAV, seguido por um período seco de 6 meses (precipitação abaixo de 50 mm.mês<sup>-1</sup>), de abril a setembro/2016 (a duração típica da estação seca é de cerca de 5 meses, entre maio e setembro; Figura 2.6a). A queda nas taxas de chuvas também foi registrada no ano seguinte (2016/17), representando  $\downarrow 22,2$  % abaixo da média.

Em 2016/17, precipitações abaixo de 50 mm.mês<sup>-1</sup> foram registradas entre maio e setembro. Nesse ano, o déficit na precipitação ao longo do período seco foi maior (114 mm), quando comparado com o ano hidrológico anterior. No entanto, a duração do período seco permaneceu dentro da média (5 meses).

No ano 2015/16, notou-se um aumento expressivo na temperatura média do ar, cerca de 4,9 °C acima da média, e nos períodos secos de 2015/16 e 2016/17, as temperaturas médias foram de 31,5 °C e 26,5 °C, respectivamente (Figura 2.6b).

O VPD exibiu valores acima da média em vários meses de 2015/16. O aumento observado no período chuvoso desse ano foi de cerca de 15% (março/16) a 104% (fevereiro/16), comparado com a média. No período seco de 2015/16, o VPD ainda permaneceu acima da média nos meses de maio (cerca de 45%) e julho/16 (cerca de 15%).

Em 2016/17, a variação do VPD permaneceu dentro da média na maior parte do ano, exceto nos meses de julho a setembro/17. Nesses meses o aumento, em relação a média, foi de até 65% (setembro/17), aproximadamente.

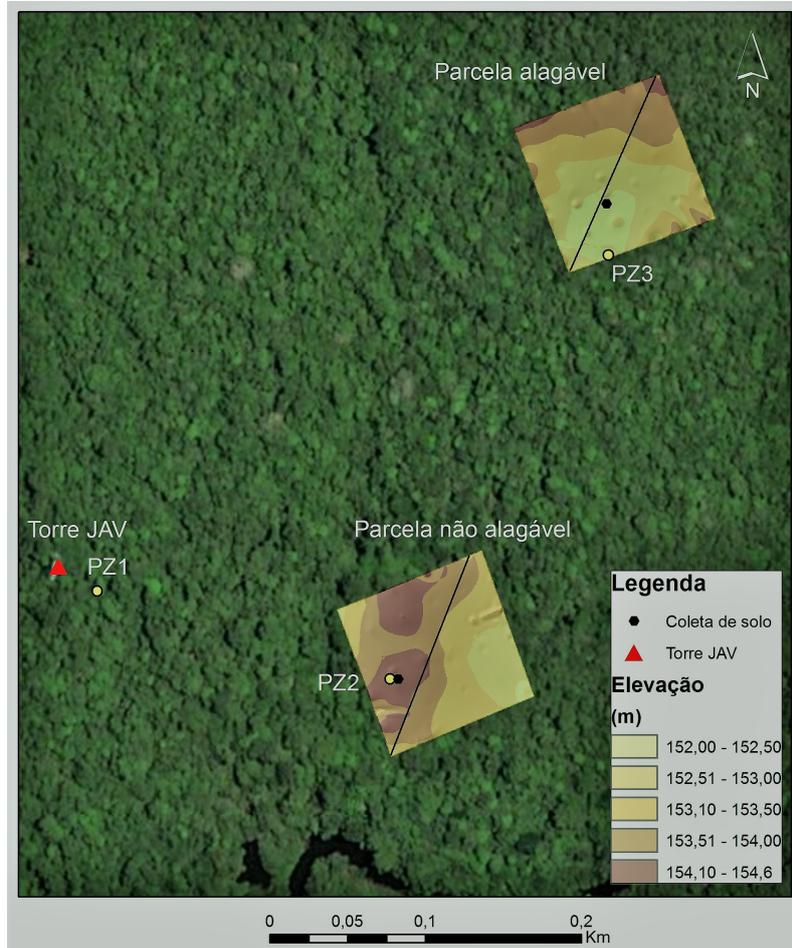
As reduções na precipitação contribuíram para diminuição expressiva na duração do período alagado e na altura da cota de alagamento em 2015/16. Esse período, que normalmente dura cerca de 5 meses (de janeiro a maio), foi de apenas dois meses (de meados de fevereiro a meados de abril). A altura do alagamento, que normalmente atinge 1,7 m acima da base da torre (Figura 2.7a), atingiu 0,5 m em 2015/16. Em 2016/17, o período alagado durou cerca de 3 meses (fevereiro a maio); e a altura do nível da água foi de 0,8 m; (Figura 2.7b). Estes resultados mostraram que o sistema não retornou à normalidade, mesmo depois de cessar o ENSO.

Em 2015/16, o nível piezométrico máximo ocorre em março e coincide com o pico de cheia (Figura 2.7c). Níveis piezométricos mínimos variaram de -3 m na parcela Alag a -5 m na base da torre (parcela torre). Apesar do início das chuvas ter ocorrido em setembro, o nível da água permaneceu mínimo até dezembro no PZ3 e até janeiro nos PZ1 e PZ2.

### **2.3.3 Levantamento topográfico**

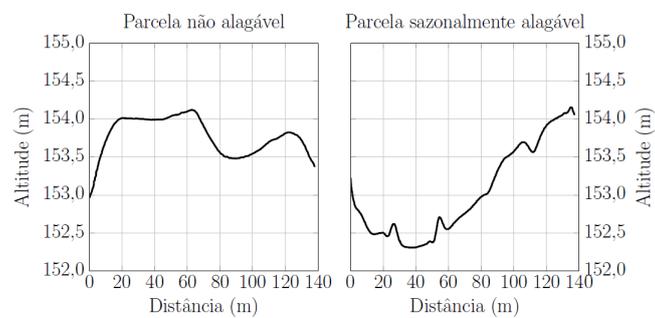
O levantamento topográfico revelou que as parcelas não são topograficamente homogêneas (Figura 2.8). O nível do terreno varia de um mínimo de 152,0 m até um máximo de 154,6 m (Figura 2.9) ao longo das parcelas Alag e N-alag. Na parcela N-alag, a altura predominante é de níveis acima de 153 m (Figura 2.8), com amplitude de 1,1 m (mínimo de 153,0 e máximo de 154,1 m). Na parcela Alag, o nível máximo é de 153,5 m, e a amplitude é igual a 1,9 m (mínimo de 152,3 e máximo de 154,2 m). A torre micrometeorológica está instalada em uma área cujo o nível é considerado intermediário, equivalendo a cerca de 154,2 m.

Figura 2.8 - Níveis topográficos da parcela sazonalmente alagável e da parcela não alagável (imagem Base Map ArcGis)



Os códigos PZ1, PZ2, e PZ3 correspondem aos piezômetros 1, 2 e 3, respectivamente. Fonte: Produção do autor.

Figura 2.9 - Perfil topográfico da parcela sazonalmente alagável e da parcela não alagável



Fonte: Produção do autor.

### 2.3.4 Identificação botânica das espécies com dendrômetros manuais

A identificação dos 168 indivíduos equipados com dendrômetros manuais das parcelas sazonalmente alagável e não alagável está apresentada nas Tabelas 2.3 e 2.4, respectivamente. Nessas tabelas foram incluídas também os potenciais locais de ocorrência dessas espécies (domínio fitogeográfico e tipo de vegetação) com intuito de verificar se as espécies são encontradas em ambientes alagáveis ou apenas não alagáveis. Essas informações foram disponibilizadas pelo projeto “Flora do Brasil 2020”, coordenado pelo Jardim Botânico do Rio de Janeiro, em parceria com instituições nacionais e internacionais (FLORA DO BRASIL 2020 EM CONSTRUÇÃO, 2018).

Tabela 2.3 - Identificação botânica das árvores com dendrômetros manuais situadas na parcela sazonalmente alagável e potenciais ambientes de ocorrência

| Família          | Espécie                           | n  | Domínio fitogeográfico <sup>1</sup> | Ocorrência   |
|------------------|-----------------------------------|----|-------------------------------------|--|
|                  |                                   |    |                                     | Tipo de vegetação <sup>2</sup>                     |
| Apocynaceae      | <i>Malouetia tamaquarina</i>      | 1  | AM                                  | FI   |
| Bignoniaceae     | <i>Handroanthus serratifolius</i> | 1  | AM, CA, CE, MA, PA                  | FTF, FEP, FO, FOM                                  |
| Burseraceae      | <i>Protium heptaphyllum</i>       | 1  | AM, CA, CE, MA                      | C, FC, FTF, FO, R, SA                              |
| Celastraceae     | <i>Salacia multiflora</i>         | 2  | AM, MA                              | C, FC, FTF, FO, R                                  |
| Chrysobalanaceae | <i>Licania egleri</i> Bench.      | 1  | AM, CE                              | CE( <i>ls</i> ), FTF, FO                           |
|                  | <i>Licania hypoleuca</i>          | 3  | AM, MA                              | FO   |
| Clusiaceae       | <i>Garcinia madruno</i>           | 1  | AM, CE, MA                          | FC, FTF, FV  |
| Elaeocarpaceae   | <i>Sloanea guianensis</i>         | 1  | AM, CE, MA                          | FC, FI, FTF, FES, FO, FOM, R                       |
| Euphorbiaceae    | <i>Mabea speciosa</i>             | 1  | AM                                  | C, FC, FI, FTF                                     |
| Fabaceae         | <i>Abarema jupunba</i>            | 1  | AM, MA                              | C, FC, FTF, FO, R                                  |
|                  | <i>Andira cordata</i> Arroyo      | 1  | CE                                  | CE( <i>ls</i> ), FES                               |
|                  | <i>Cynometra bauhiniifolia</i>    | 1  | AM, CE                              | FC, FV, FTF, IG                                    |
|                  | <i>Tachigali vulgaris</i>         | 5  | AM, CA, CE                          | CE( <i>ls</i> ), FC, FED, FES, SA                  |
| Melastomataceae  | <i>Mouriri ficoides</i> Morley    | 6  | AM                                  | FTF  |
| Moraceae         | <i>Brosimum gaudichaudii</i>      | 11 | AM, CA, CE, MA                      | AA, CE( <i>ls</i> ), SA                            |
|                  | <i>Maquira guianensis</i>         | 1  | AM                                  | FTF, FO  |
| Myrtaceae        | <i>Calycolpus revolutus</i>       | 3  | AM                                  | CA, FTF, SA  |
|                  | <i>Eugenia florida</i>            | 1  | AM, CA, CE, MA                      | CA( <i>ss</i> ), CE( <i>ls</i> ), FTF, FV, FES, FO |
|                  | <i>Myrcia fenestrata</i>          | 1  | AM                                  | CA, CE, FTF  |
| Pentaphragmaceae | <i>Ternstroemia brasiliensis</i>  | 3  | AM, CE, MA                          | CR, FES, FO, FOM, R                                |
| Phyllanthaceae   | <i>Discocarpus brasiliensis</i>   | 12 | AM, CE                              | C, FC, FI, FTF, FV                                 |
| Picrodendraceae  | <i>Piranhea trifoliata</i>        | 6  | AM                                  | C, FC, FI, FV, R, FSAR                             |
| Proteaceae       | <i>Roupala montana</i>            | 6  | AM, CA, CE, MA                      | C, CL, CR, CE( <i>ls</i> ), FC, FED, FES           |
| Rubiaceae        | <i>Duroia genipoides</i>          | 7  | AM                                  | FI, FV   |
| Sapotaceae       | <i>Micropholis acutangula</i>     | 1  | AM                                  | FTF  |
|                  | <i>Pouteria ramiflora</i>         | 1  | AM, CA, CE, MA                      | CE( <i>ls</i> ), R                                 |
|                  | <i>Pouteria sp.</i>               | 5  | -                                   | -  |
| TOTAL            |                                   | 84 |                                     |  |

n = número de indivíduos.

<sup>1</sup>: AM = Amazônia; CA = Caatinga; CE = Cerrado; MA = Mata Atlântica; PA = Pantanal.

<sup>2</sup>: AA = Área Antrópica; C = Campinarana; CA(*ss*) = Caatinga (*stricto sensu*); CE(*ls*) = Cerrado *lato sensu*; CL = Campo Limpo; CR = Campo Rupestre; FC = Floresta Ciliar ou de Galeria; FED = Floresta Estacional Decidual; FEP = Floresta Estacional Perenifólia; FES = Floresta Estacional Semidecidual; FI = Floresta de Igapó; FO = Floresta Ombrófila; FOM = Floresta Ombrófila Mista; FSAR = Vegetação Sobre Afloramentos Rochosos; FTF = Floresta de Terra Firme; FV = Floresta de Várzea; IG = Igarapé; R = Restinga; SA = Savana Amazônica.

Fonte: Produção do autor.

Tabela 2.4 - Identificação botânica das árvores com dendrômetros manuais situadas na parcela não alagável e potenciais ambientes de ocorrência

| Família          | Espécie                           | n  | Domínio fitogeográfico <sup>1</sup> | Ocorrência                     |
|------------------|-----------------------------------|----|-------------------------------------|--------------------------------|
|                  |                                   |    |                                     | Tipo de vegetação <sup>2</sup> |
| Annonaceae       | <i>Xylopia brasiliensis</i>       | 7  | MA                                  | FES, FO                        |
|                  | <i>Xylopia calophylla</i>         | 1  | AM                                  | FI, FTF, FV                    |
| Bignoniaceae     | <i>Handroanthus serratifolius</i> | 1  | AM, CA, CE, MA                      | FTF, FEP, FO, FOM              |
| Chrysobalanaceae | <i>Licania egleri</i>             | 3  | AM, CE                              | CE(ls), FTF, FO                |
|                  | <i>Licania hypoleuca</i>          | 1  | AM, MA                              | FO                             |
|                  | <i>Licania pallida</i>            | 1  | AM                                  | FTF, FO                        |
|                  | <i>Licania sprucei</i>            | 8  | AM                                  | FTF, FO                        |
| Combretaceae     | <i>Buchenavia congesta</i>        | 1  | AM                                  | FI, FTF, FO                    |
|                  | <i>Terminalia amazonia</i>        | 1  | AM                                  | FC, FTF                        |
| Elaeocarpaceae   | <i>Sloanea nitida</i>             | 1  | AM                                  | AA, FC, FTF, FES, FO           |
| Fabaceae         | <i>Cynometra bauhiniifolia</i>    | 1  | AM, CE                              | FC, FV, FTF, IG                |
|                  | <i>Hymenolobium petraeum</i>      | 1  | AM                                  | FC, FTF                        |
|                  | <i>Inga laurina</i>               | 3  | AM, CA, CE, MA                      | CR, FES, FO, R                 |
| Hypericaceae     | <i>Zygia juruana</i>              | 1  | AM                                  | FTF, FV                        |
|                  | <i>Vismia cayennensis</i>         | 1  | AM, CE                              | C, FC, FI, FTF, FV             |
| Lecythidaceae    | <i>Eschweilera nana</i>           | 1  | AM, CA, CE                          | CE                             |
| Melastomataceae  | <i>Loreya spruceana</i>           | 3  | AM                                  | FTF                            |
|                  | <i>Mouriri apiranga</i>           | 5  | AM                                  | FC, FI, FV, R, FSAR            |
|                  | <i>Mouriri ficoides</i>           | 1  | AM                                  | FTF                            |
| Moraceae         | <i>Brosimum gaudichaudii</i>      | 14 | AM, CA, CE, MA                      | AA, CE(ls), SA                 |
|                  | <i>Brosimum guianensis</i>        | 4  | AM, CA, CE, MA                      | AA, FTF, FEP                   |
| Phyllanthaceae   | <i>Discocarpus brasiliensis</i>   | 5  | AM, CE                              | C, FC, FI, FTF, FV             |
| Rubiaceae        | <i>Duroia genipoides</i>          | 3  | AM                                  | FI, FV                         |
| Sapindaceae      | <i>Cupania scrobiculata</i>       | 1  | AM, MA                              | C, FTF, FO                     |
|                  | <i>Micropholis cylindrocarpa</i>  | 1  | AM, MA                              | FTF                            |
|                  | <i>Micropholis guyanensis</i>     | 10 | AM                                  | FI, FTF, FV, FEP, FES, FO      |
|                  | <i>Pouteria macrophylla</i>       | 1  | AM, CE, MA                          | FC, FEP, FES, FO               |
|                  | <i>Pouteria ramiflora</i>         | 3  | AM, CA, CE, MA                      | CE, R                          |
| TOTAL            |                                   | 84 |                                     |                                |

n = número de indivíduos.

<sup>1</sup>: AM = Amazônia; CA = Caatinga; CE = Cerrado; MA = Mata Atlântica; PA = Pantanal.

<sup>2</sup>: AA = Área Antrópica; C = Campinarana; CA(ss) = Caatinga (*stricto sensu*); CE(ls) = Cerrado *lato sensu*; CR = Campo Rupestre; FC = Floresta Ciliar ou de Galeria; FED = Floresta Estacional Decidual; FEP = Floresta Estacional Perenifolia; FES = Floresta Estacional Semidecidual; FI = Floresta de Igapó; FO = Floresta Ombrófila; FOM = Floresta Ombrófila Mista; FSAR = Vegetação Sobre Afloramentos Rochosos; FTF = Floresta de Terra Firme; FV = Floresta de Várzea; IG = Igarapé; R = Restinga; SA = Savana Amazônica.

Fonte: Produção do autor.

Através do levantamento botânico identificou-se: 46 espécies, 35 gêneros e 23 famílias nas duas parcelas (Tabelas 2.3 e 2.4). Nesse levantamento, as famílias que apresentaram o maior número de indivíduos foram: Moraceae, Sapotaceae, e Chrysobalanaceae, com um total 30, 22 e 17 indivíduos, respectivamente.

As quatro espécies mais representativas ( $n \geq 10$ ) nas parcelas de estudo foram: *Brosimum gaudichaudii*, *Discocarpus brasiliensis*, *Duroia genipoides* e *Micropholis guyanensis*. Exceto pela *Brosimum gaudichaudii*, tratam-se de espécies normalmente encontradas em ambientes sazonalmente alagáveis, como mostram as Tabelas 2.3 e 2.4.

Na parcela sazonalmente alagável foram registradas 27 espécies, 25 gêneros e 18 famílias (Tabela 2.3), enquanto na parcela não alagável, 28 espécies, 20 gêneros e 14

famílias (Tabela 2.4). Apenas nove espécies foram comuns entre as parcelas, que são: *Brosimum gaudichaudii*, *Cynometra bauhiniifolia*, *Discocarpus brasiliensis*, *Duroia genipoides*, *Handroanthus serratifolius*, *Licania egleri*, *Licania hypoleuca*, *Mouriri ficoides*, e *Pouteria ramiflora*, com predominância da *Brosimum gaudichaudii* com 25 indivíduos, o que corresponde a 15% do total de indivíduos observados.

Cerca de 44% das espécies das parcelas alagável e não alagável ocorrem em ambientes sazonalmente alagáveis de outras regiões (Tabelas 2.3 e 2.4), como nas florestas ciliares nos domínios fitogeográficos da Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal, e nas florestas de igapó e de várzeas da Amazônia. Esses resultados indicam a existência de espécies tolerantes ao alagamento em ambas as parcelas.

### 2.3.5 Crescimento do tronco em áreas sazonalmente alagáveis

#### 2.3.5.1 Padrão de crescimento

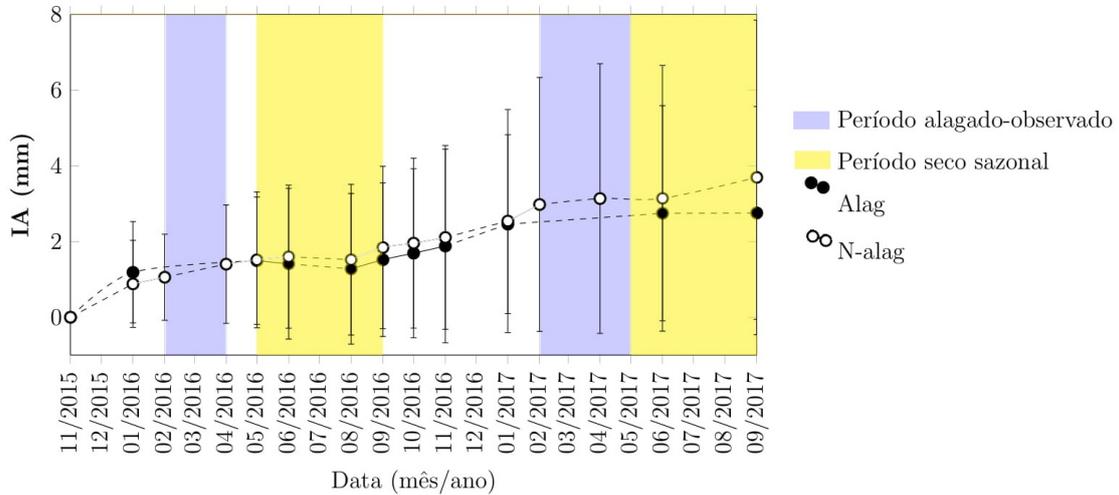
A variação do incremento acumulado durante o período analisado pode ser observado na Figura 2.10. O crescimento do tronco das árvores na parcela Alag foi acentuado no período chuvoso do ano hidrológico de 2015/16 (KW=110,79 e  $p < 0,05$ ), nos meses sem alagamento (novembro/2015 e janeiro/2016). O mesmo padrão foi observado na parcela N-alag (KW=83,07 e  $p < 0,05$ ).

No período alagado de 2015/16, percebeu-se um estacionamento no crescimento das árvores na parcela Alag, com base nos valores registrados nos períodos pré e pós-alagamento, ou seja, janeiro e maio de 2015/16 (KW=1,75 e  $p = 0,19$ ). Esse é um indicativo de dormência do tronco. Não foi possível avaliar o crescimento dessas árvores durante o período alagado devido dificuldades de acesso ao local.

Semelhantemente, as árvores da parcela N-alag apresentaram dormência do tronco no período alagado de 2015/16 (fevereiro e abril/2016; KW=1,67 e  $p = 0,20$ ), mesmo exibindo uma ligeira tendência de aumento no tronco, como mostra a Figura 2.10.

No início do período seco de 2015/16 (maio a agosto de 2016), os dados mostraram uma redução do crescimento em ambas as parcelas (Alag: KW=1,36 e  $p = 0,29$ ; N-alag: KW=0,31 e  $p = 0,85$ ), seguido de um crescimento acentuado de agosto/2016 a janeiro/2017 na parcela Alag (KW=9,63 e  $p < 0,05$ ) e de agosto/2016 a fevereiro/2017 na parcela N-alag (KW=10,91 e  $p < 0,05$ ). Esse período compreende a transição entre os períodos seco e chuvoso e o início do ano hidrológico de 2016/17 (outubro/2016).

Figura 2.10 - Valores médios de incrementos acumulado do diâmetro do tronco, com os respectivos desvios padrões, nas parcelas sazonalmente alagável (Alag; n=84) e não alagável (N-alag; n=84) monitoradas com dendrômetros manuais.



A linha tracejada refere-se à ausência de dados no intervalo.

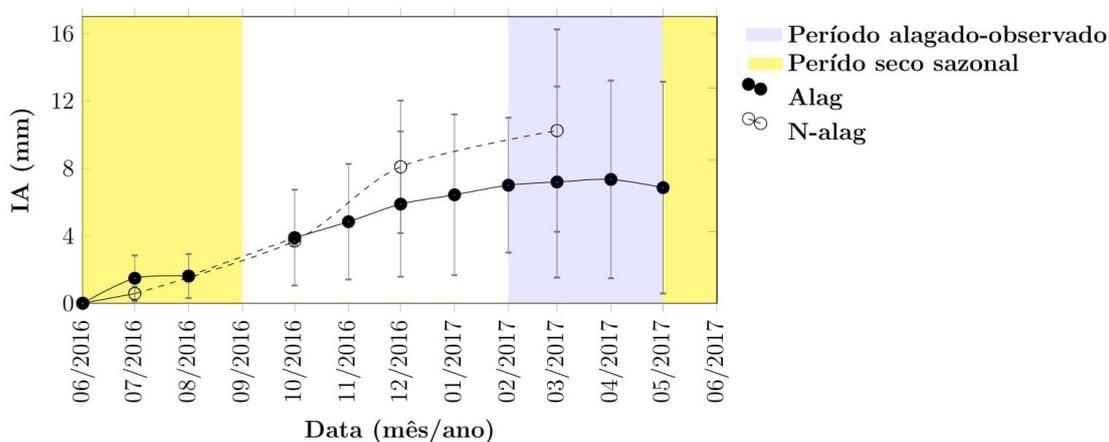
Fonte: Produção do autor.

Conforme a Figura 2.10, o tronco voltou indicar dormência cambial em ambas as parcelas no período alagado do ano hidrológico de 2016/17. Esse padrão foi registrado na parcela Alag de acordo com as medidas dos períodos pré e pós-alagamento, nesse caso, janeiro e junho/2017 ( $KW=0,64$  e  $p=0,42$ ), enquanto na parcela N-alag, nos meses de fevereiro a junho/2017 ( $KW=0,029$  e  $p=0,99$ ).

No período seco de 2016/17, não foram realizadas medidas do incremento do tronco nos meses de julho e agosto/2017 para acompanhar a variação do crescimento. No entanto, com base nas medidas realizadas nos meses de junho e setembro/2017, nota-se que o crescimento do tronco permaneceu inalterado nas parcelas Alag ( $KW=0,05$  e  $p=0,83$ ) e N-alag ( $KW=1,59$  e  $p=0,17$ ) nesse período. Esse comportamento com o padrão observado no ano anterior.

O mesmo padrão de crescimento apresentado pelas árvores das parcelas foi observado em árvores localizadas ao redor da Torre, tanto em ambiente sazonalmente alagado ( $n=5$ ), quanto em ambiente não alagado ( $n=2$ ), quando monitorados com dendrômetro automático Figura 2.11. Nota-se que a taxa de crescimento nesse grupo avaliado difere das árvores das parcelas experimentais em função do número amostral ( $n$ ).

Figura 2.11 - Valores médios de incrementos em diâmetro do tronco com os respectivos desvios padrões, no entorno da torre micrometeorológica, área sazonalmente alagável (Alag; n=5) e não alagável (N-alag; n=2) monitoradas com dendrômetros automáticos.



Linhas tracejadas referem-se à ausência de dados no período observado.  
 Fonte: Produção do autor.

Destaca-se que a análise de correlação revelou que o padrão de crescimento do tronco da parcela N-alag foi semelhante da parcela Alag ( $R^2 = 0,92$ ;  $p < 0,05$ ), mesmo se tratando de um ambiente isentos de submersão. Provavelmente esse comportamento foi influenciado pelas condições hídricas do ambiente. A parcela N-alag está sujeita ao aumento da umidade do solo no período alagado, em decorrência do volume de chuvas e a elevação do lençol freático (até -2,2 m de profundidade em março; Figura 2.7).

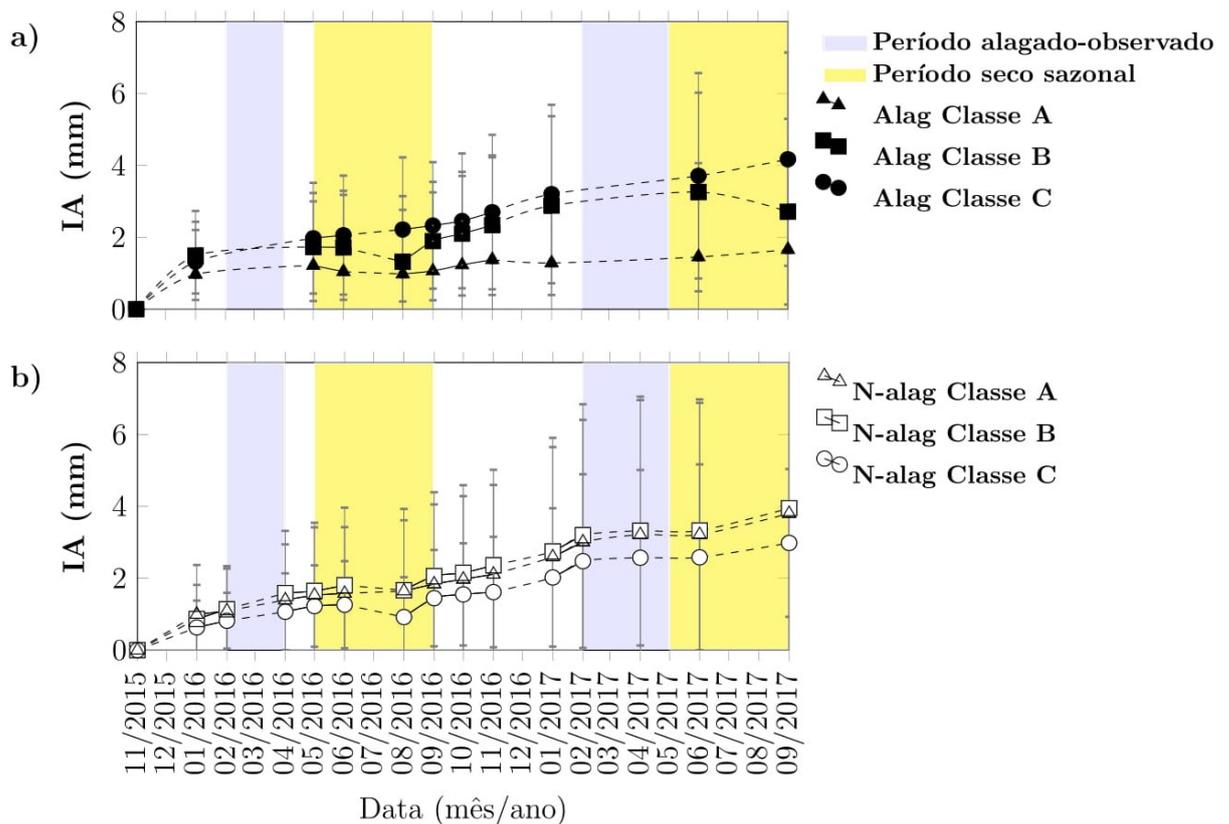
O incremento do tronco registrado no final do período avaliado (setembro/2017) também foi estatisticamente semelhante entre as parcelas Alag e N-alag ( $KW=1,47$  e  $p=0,23$ ). Apesar das semelhanças, as árvores localizadas na parcela N-alag exibiram um crescimento médio de cerca de 27% acima (setembro/2017; IA médio = 3,69 mm), do que as árvores da parcela Alag (setembro/2017; IA médio = 2,75 mm), conforme mostra a Figura 2.10.

Estes resultados sugerem três períodos anuais de impactos ambientais sobre o crescimento do tronco das árvores: alagamento e o período seco, onde ocorrem um período de dormência e de decréscimo do crescimento; seguido de uma fase de crescimento com o início das chuvas.

### 2.3.5.2 Crescimento do tronco em função do DAP

A Figura 2.12 mostra o padrão de crescimento do tronco segundo o tipo de parcela e classe de DAP nos dois anos avaliados. As classes de DAP referem-se a três grupos de tamanho do tronco: classe A (10,0 a 19,9 cm); classe B (20,0 a 29,9 cm); e classe C (>30,0 cm), em ambas as parcelas. Na sequência, a Tabela 2.5 apresenta os padrões de crescimento ou tendências, com as respectivas probabilidades de significância (p), observados nos períodos chuvoso não-alagado, alagado e seco de 2015/15 e 2016/17, com base nas medidas do IA do tronco realizadas nesses períodos.

Figura 2.12 - Incremento acumulado do diâmetro do tronco na parcela sazonalmente alagável (Alag) e parcela não alagável (N-alag) com os respectivos desvios padrões, agrupadas segundo a classe de DAP



A linha tracejada refere-se à ausência de dados no intervalo. A classe A representa o grupo de árvores com DAP de 10,0 a 19,9 cm; a classe B - DAP de 20,0 a 29,9 cm; e a classe C - DAP >30,0 cm.

Fonte: Produção do autor.

As medidas selecionadas para representar os períodos chuvoso não-alagado, alagado, e seco de 2015/16 foram realizadas em: novembro/15 e janeiro/16; fevereiro e abril/16; e junho e setembro/16. Para 2016/17 foram utilizadas as medidas realizadas nos seguintes meses: novembro/16 e janeiro/17; março e abril/17; e junho e setembro/17. Excepcionalmente para parcela Alag, utilizou-se os seguintes meses para representar o período alagável do 2015/16 e 2016/17: janeiro e junho/16; e janeiro e junho/17, respectivamente.

Conforme a Figura 2.12 e a Tabela 2.5, o padrão do crescimento do tronco para as três classes de DAP avaliados na parcela Alag e parcela N-alag apresentaram o mesmo comportamento nos dois anos avaliados, ou seja, crescimento positivo no período chuvoso não-alagado, e redução do ritmo de crescimento (dormência ou crescimento estacionário) nos períodos alagado e seco. Apesar das semelhanças no padrão de crescimento, sugere-se que no período onde observou-se tendência de contração do tronco nas árvores da parcela Alag (junho a agosto/2016) em função da perda de água, mostrado na Figura 2.10, tenha sido determinado especialmente pelos indivíduos que apresentaram classe de DAP tamanho médio (DAP=20 a 29,9 cm) (Figura 2.12a). Já para a parcela N-alag, essa a tendência da mesma redução pode ter sido influenciada pelos indivíduos da classe C (ou seja, DAP= $\geq$  30 cm) (Figura 2.12b).

Tabela 2.5 - Padrões de crescimento do tronco, com as respectivas probabilidades de significância (p), observados nos períodos chuvoso não-alagado, alagado e seco de 2015/15 e 2016/17

| Parcela | Classe de DAP | 2015/16             |               |                | 2016/17             |               |               |
|---------|---------------|---------------------|---------------|----------------|---------------------|---------------|---------------|
|         |               | chuvoso não-alagado | alagado       | seco           | chuvoso não-alagado | alagado       | seco          |
| Alag    | A<br>n=43     | ↑<br>(p<0,05)       | ↔<br>(p=0,97) | ↔<br>(p=0,97)  | ↔+<br>(p=0,97)      | ↔<br>(p=0,97) | ↔<br>(p=0,97) |
|         | B<br>n=28     | ↑<br>(p<0,05)       | ↔<br>(p=0,93) | ↔-<br>(p=0,93) | ↔+<br>(p=0,93)      | ↔<br>(p=0,93) | ↔<br>(p=0,93) |
|         | C<br>n=13     | ↔+<br>(p=0,05)      | ↔<br>(p=0,98) | ↔<br>(p=0,98)  | ↔+<br>(p=0,98)      | ↔<br>(p=0,98) | ↔<br>(p=0,98) |
| N-alag  | A<br>n=36     | ↑<br>(p<0,05)       | ↔<br>(p=0,99) | ↔<br>(p=0,99)  | ↔+<br>(p=0,99)      | ↔<br>(p=0,99) | ↔<br>(p=0,99) |
|         | B<br>n=30     | ↑<br>(p<0,05)       | ↔<br>(p=0,98) | ↔<br>(p=0,98)  | ↔+<br>(p=0,98)      | ↔<br>(p=0,98) | ↔<br>(p=0,98) |
|         | C<br>n=16     | ↔+<br>(p=0,85)      | ↔<br>(p=0,99) | ↔-<br>(p=0,99) | ↔+<br>(p=0,99)      | ↔<br>(p=0,99) | ↔<br>(p=0,99) |

n = número de árvores; ↔ = representa a dormência do tronco (período alagado) e a redução do ritmo de crescimento do tronco/estabilização (período seco ou chuvoso não-alagado), com base na ausência de variação estatisticamente entre as médias avaliadas; ↑ = indica o aumento do crescimento; + = indica tendência de crescimento, e - = representa tendência para contração do tronco em função da perda de água.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 2.12 também indica que as árvores maiores (DAP:  $\geq 30$  cm) tendem a crescer mais que as menores (DAP: 10 a 19,9 cm) na parcela Alag (KW=0,47 e  $p<0,05$ ), ao passo que as árvores da parcela N-alag apresentam ganhos semelhantes no IA nos dois anos avaliados (KW=4,70 e  $p<0,09$ ).

Em geral, o padrão de crescimento foi caracterizado por dormência do tronco durante o período alagado e crescimento no período chuvoso isento de alagamento. Contudo, a parcela N-alag exibiu um padrão muito semelhante para todos os grupos de DAP, enquanto a parcela Alag mostrou variação no IA acumulado médio entre as classe estudadas.

### 2.3.5.3 Crescimento acumulado anual

Na Tabela 2.6 é apresentado o incremento acumulado (IA) anual médio do diâmetro do tronco nos anos hidrológicos secos (2015/16 e 2016/17) e nos anos não atípicos (não-Enso). Nessa Tabela, as letras iguais entre si indicam médias estatisticamente semelhantes pelos teste de Kruskal Wallis a 5% de significância e comparação múltipla pelo método de Simes-Hochberg, enquanto as letras maiúsculas comparam as médias dentro do ano analisado, e as letras minúsculas comparam as médias entre os anos (não-ENSO, ENSO e pós-ENSO).

Tabela 2.6 - Valores médios dos incrementos acumulados do diâmetro do tronco nos anos hidrológicos secos 2015/16, 2016/17 e anos não atípicos em parcela sazonalmente alagável (Alag) e parcela não alagável (N-alag)

| Anos                   | Incremento acumulado anual (mm) | Desvio padrão ( $\pm$ ) | Parcela |
|------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------|
| não-ENSO (2013 a 2015) | 3,4Aa                           | 2,8                     | Alag    |
|                        | 2,9Ab                           | 2,4                     | N-alag  |
| ENSO (2015/16)         | 1,7Ba                           | 2,2                     | Alag    |
|                        | 2,0Aa                           | 2,3                     | N-alag  |
| pós-ENSO (2016/17)     | 0,7Cb                           | 2,1                     | Alag    |
|                        | 2,0Aa                           | 2,2                     | N-alag  |

Letras iguais entre si indicam médias estatisticamente semelhantes pelos teste de Kruskal Wallis a 5% de significância (KW=69,7 e  $p<0,05$ ) e comparação múltipla pelo método de Simes-Hochberg. As letras minúsculas comparam as médias das parcelas (Alag e N-alag) dentro do ano analisado; e as letras maiúsculas comparam as médias de cada parcela entre os anos (não-ENSO, ENSO e pós-ENSO). As letras foram coloridas para facilitar a identificação.

Fonte: Produção do autor.

Considerando as parcelas avaliadas, observou-se que os IA anuais das árvores em parcela Alag foram superiores nos anos de não-ENSO, aos da parcela N-alag (KW=9,96 e  $p<0,05$ ) (a Tabela 2.6). No entanto, o padrão foi inverso no ano pós-ENSO, ou seja, os IA anuais na parcela Alag foram inferiores aos da parcela N-alag (KW=14,98 e  $p<0,05$ ). O IA anual não variou entre as parcelas no ano de ENSO (KW=0,01 e  $p<0,90$ ).

Conforme a Tabela 2.6, o IA foi menor nos anos secos na parcela Alag, comparado com os anos não-ENSO, principalmente após a ocorrência do ENSO (pós-ENSO).

Observou-se uma redução de cerca de 50% no crescimento no ano de ENSO e, 80% aproximadamente, nos anos de não-ENSO.

Não foi identificado variação estatisticamente significativa do IA anual na parcela N-alag. No entanto, nota-se uma perda de 31%, aproximadamente, no IA anual nos anos secos (ENSO e pós-ENSO).

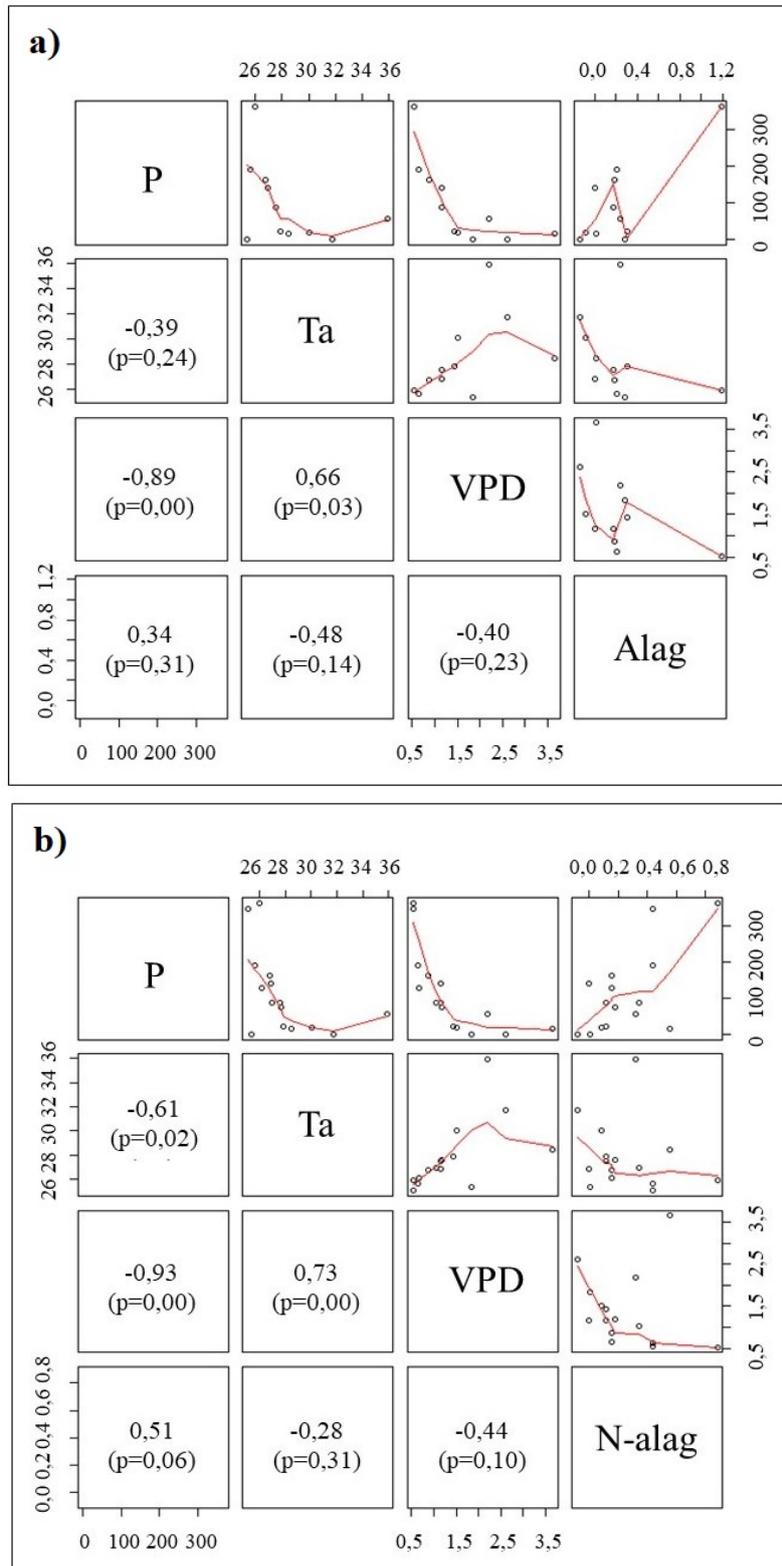
#### **2.3.5.4 Crescimento do tronco e condicionantes climáticos**

A Figura 2.13 apresenta o resultado da análise de correlação entre as variáveis climáticas (precipitação, temperatura média do ar, e VPD) e o incremento do tronco observado nas parcelas Alag e N-alag. Os dados de IA da parcela Alag representam apenas a fase seca, ou seja, o período seco e o período chuvoso não-alagado (Figura 2.13a).

As variáveis precipitação e VPD apresentaram correlação negativa ( $\rho=-0,89$  e  $p=0,00$ ) e, a temperatura média do ar, como esperado, apresentou correlação positiva com o VPD ( $\rho=0,66$  e  $p=0,03$ ). Ainda que, a temperatura do ar ( $\rho=-0,48$  e  $p=0,14$ ) e o VPD ( $\rho=-0,44$  e  $p=0,23$ ) tenham representado mais de 35% da variação do IA, essa representação não foi estatisticamente significativa, da mesma forma entre precipitação e IA ( $\rho=0,34$  e  $p=0,31$ ). No entanto, nota-se um tendência de correlação negativa do IA com temperatura e VPD, e positiva com a precipitação.

A tendência de correlação negativa detectada nesta análise entre essas variáveis corroboram com o padrão observado, uma vez que, os anos de ENSO e pós-ENSO foram marcados por aumentos na  $T_a$  e no VPD (Figura 2.6) e por reduções acentuadas no IA (Tabela 2.6).

Figura 2.13 - Matriz de correlação entre as variáveis climáticas (precipitação, temperatura média do ar, e VPD) e o incremento do tronco observado na parcela sazonalmente alagável (Alag) e parcela não alagável (N-alag)



Fonte: Produção do autor.

A matriz de correlação entre as variáveis climáticas e o IA da parcela N-alag contemplou mais medidas de crescimento, comparado com a parcela Alag (Figura 2.13b). Essa última não possuía medida de IA no período alagável. Por isso, percebe-se que os valores de rho na Figura 2.13a foram maiores, quando comparado com os da Figura 2.13b.

Apesar do aumento no valor de rho na parcela N-alag, o padrão entre as variáveis foi semelhante entre parcelas. A correlação foi negativa entre precipitação e a temperatura ( $\rho=-0,61$  e  $p=0,02$ ), e positiva entre temperatura e VPD ( $\rho=0,73$  e  $p=0,00$ ). A precipitação e o VPD foram as variáveis com os maiores valores de rho, quando correlacionadas com o IA das árvores na parcela N-alag. No entanto, essas relações não foram estatisticamente significativas considerando o nível de 5% de probabilidade.

Ainda que as influências da precipitação e da temperatura tenham apresentado variações entre as parcelas, a contribuição do VPD foi a que menos sofreu alteração. Esse resultado reforça a importância da variável no crescimento do tronco.

Em geral, esta análise indicou que o crescimento do tronco das árvores da parcela N-alag podem ser mais afetada por reduções na precipitação, do que elevações na temperatura. Enquanto na parcela Alag, é possível que a temperatura do ar e o VPD tenham desempenhado um importante papel no crescimento das árvores na região de estudo.

## 2.4 Discussões

### 2.4.1 Padrão de crescimento do tronco em florestas sazonalmente alagáveis e não alagáveis

Estudos analisando a variação do incremento radial de tronco mostraram um padrão diferente entre floresta de terra firme e floresta sazonalmente alagáveis dos biomas Amazônia e Cerrado. Nas florestas de terra firme da Amazônia, o padrão de crescimento do tronco foi caracterizado por aumento no período chuvoso e redução no período seco (GROGAN; SCHULZE, 2012; SILVA et al., 2003; WAGNER et al., 2016), o mesmo padrão foi observado para as florestas do Cerrado (FERREIRA-FEDELE et al., 2004; LISI et al., 2013; MATTOS et al., 2004; ROSSATTO et al., 2009). No entanto, nas florestas sazonalmente alagáveis (várzeas amazônicas), o crescimento do tronco foi mais pronunciado no período seco (SCHÖNGART et al., 2002; SCHÖNGART et al., 2004; WORBES, 1989).

No bioma Pantanal, espécies consideradas bem adaptadas às inundações, como *Vochysia divergens* Pohl. (Vochysiaceae) (DALMAGRO et al., 2014; DALMAGRO et al., 2016), comumente encontradas em ambientes onde a inundação pode durar até seis meses, apresentaram redução do crescimento do tronco durante o período alagado, indicando tratar-se de período limitante (AQUINO, 2016). Apesar dos efeitos inibitórios do alagamento no crescimento, o crescimento do tronco foi mais afetado pelo estresse hídrico causado pela seca, comparado com o alagamento (CUNHA; JUNK, 2009).

O padrão de crescimento do tronco de uma floresta sazonalmente alagável, na planície do rio Araguaia, também reconhecida como cerrado sazonalmente alagável ou hipersazonal (JUNK et al., 2013), foi semelhante ao observado nas áreas sazonalmente alagáveis da Amazônia e do Pantanal, isto é, dormência de troncos nos meses submersos, e crescimento do tronco na transição entre os períodos seco e chuvoso. No entanto, nossos resultados também apontam para uma diminuição no incremento acumulado no período seco, demonstrando a ocorrência de um padrão bimodal, como reportado por outros autores sobre o funcionamento dessa floresta (BORMA et al., 2009; COSTA, 2015; FONSECA et al., 2019). Enquanto o alagamento causa mudanças nas propriedades estruturais e morfológicas das árvores, como altura, tamanho do dossel, composição de espécies e densidade da madeira (KURZATKOWSKI et al., 2015), o período seco leva a uma menor produção de biomassa acima do solo nessa floresta (HOMEIER et al., 2017). Além disso, Costa (2015) e Fonseca et al. (2019) relataram redução na assimilação de carbono e aumento na queda de folhas em ambos os períodos (alagado e seco).

A redução do crescimento no período seco pode ser explicada em parte pela reduzida disponibilidade de água no solo e conseqüentemente, pelo uso de água armazenada no tronco para manter a transpiração (STAHL et al., 2010; ZWEIFEL et al., 2000; ZWEIFEL et al., 2001; ZWEIFEL et al., 2016). Nessa floresta o solo é predominantemente arenoso, capaz de reter menos água para atender às demandas atmosféricas no período seco sazonal da ordem de 5 meses, típicas do Cerrado (BORMA et al., 2009; ROCHA et al., 2009) ou nas secas prolongadas nos anos secos (COSTA, 2015). Em ambos os casos, apesar do alto acúmulo de água no período chuvoso, essa água pode não ser suficiente para suprir a demanda atmosférica durante um longo período seco.

O período seco também foi marcado por elevações na temperatura do ar em de 2015/16, e no VPD, em 2016/17 (Figura 2.6). A análise de correlação entre as variáveis climáticas e o IA do tronco indicaram possíveis reduções no crescimento

associados com o aumento da temperatura do ar e do VPD, que são indicativos de aumento da demanda evaporativa da atmosfera.

Os resultados deste estudo também mostraram redução no incremento acumulado durante o período seco, entre as árvores de porte médio ( $20,0 < \text{DAP} < 29,9$  cm) da parcela Alag, enquanto o mesmo efeito foi registrado entre as árvores maiores ( $\text{DAP}: \geq 30,0$  cm) da parcela N-alag. O impacto das secas nas árvores maiores tem sido apontado por vários autores (BENNETT et al., 2015; NEPSTAD et al., 2007), muitas vezes justificado pela redução da condutividade hidráulica. Embora as árvores maiores sejam capazes de acessar a água armazenada nas camadas mais profundas do solo (NEGRON-JUAREZ et al., 2007), por serem altas, o fluxo de água pode estar sujeito a um adicional gravitacional, capaz de reduzir o volume que atinge o dossel (ABDU-HAMID; MENCUCINI, 2009; BLACK et al., 2008; RYAN; YODER, 1997). Nesse caso, a menor quantidade de água que chega às folhas pode causar estresse hídrico temporário e induzir o fechamento estomático, diminuindo a taxa fotossintética, produção de fotoassimilados e, conseqüentemente, crescimento das árvores (RYAN; YODER, 1997).

#### **2.4.2 Como uma seca severa de um ano seco (ENSO) influencia no crescimento do tronco de florestas sazonalmente alagáveis?**

Neste trabalho apresentou-se os impactos do ano de ENSO nas condições hidroclimáticas e os efeitos no crescimento de uma floresta alagável na planície do rio Araguaia. Em 2015/16, o volume de chuvas foi menor (31%), reduzindo a duração e o nível da água das inundações. Conseqüentemente, o período seco foi prolongado (7 meses, com a precipitação menor que  $50 \text{ mm.mês}^{-1}$ ). No mesmo ano foram reportados valores elevados de déficit de água (precipitação - evapotranspiração), de temperatura do ar e de VPD, alterando o padrão fenológico das árvores dessa floresta (FONSECA et al., 2019). As respostas das árvores estudadas (em termos de incremento do tronco) às mudanças hidroclimáticas foram redução do crescimento na fase seca (período seco) e alagada (dormência).

O efeito das secas extremas nas florestas sazonalmente alagáveis ainda é pouco investigado (PIEDEDE et al., 2013). Alguns trabalhos realizados nas várzeas amazônicas mostraram que em 1926, considerado como um ano de seca excepcional na região associada a um forte ENSO (WILLIAMS et al., 2005), a fase terrestre foi expandida, contribuiu para o crescimento de espécies das várzeas baixas, sendo que uma delas, a *Piranhea trifoliata* (Euphorbiaceae) que apresentou seu maior recorde de crescimento do tronco nos últimos 140 anos (SCHÖNGART et al., 2004).

Várias árvores submetidas ao alagamento sazonal aumentam o crescimento do tronco nos anos em que o nível da inundação e a duração do período submerso foram menores, como observado nas várzeas (PARENT et al., 2008; SCHÖNGART et al., 2002; SCHÖNGART et al., 2004). No entanto, diferente do que foi relatado para várzeas baixas (SCHÖNGART et al., 2004), no ano em que as inundações foram menores e o período seco foi prolongado o crescimento anual reduziu cerca de 50% (Tabela 2.6), comparado com os anos não-ENSO. Isso sugere que, qualquer condição favorável para o crescimento de tronco proporcionado pela redução do período alagado, foi reduzida pelo aumento do período seco.

Outra condição que merece destaque foi a resposta da floresta alagável da planície do rio Araguaia, em termos de crescimento das árvores, quando exposta a dois anos secos consecutivos (secas interanuais). Neste trabalho observou-se maior redução no crescimento do tronco, cerca de 80%, no final do segundo ano seco (2016/17), comparado com os anos não atípicos (Tabela 2.6). Possivelmente, as irregularidades na precipitação, disponibilidade de água no solo associadas com a variação sazonal da temperatura e aumento do VPD contribuíram para impactos mais intensos no crescimento das árvores nessas áreas.

As diferenças no padrão de crescimento das árvores das várzeas baixas e da planície do rio Araguaia podem ter importantes consequências para o balanço de carbono do ecossistema nos anos secos e nos anos secos consecutivos. A princípio, enquanto as várzeas baixas têm o potencial para manter a absorção de carbono elevada, favorecida pelas condições de secas (SCHÖNGART et al., 2004), as florestas da planície do rio Araguaia provavelmente reduzem sua capacidade, limitadas também pela seca. Estudos como este podem ser usados para gerar discussões sobre os efeitos da seca e o impacto da mudança climática na vegetação (MALHI et al., 2009), considerando as especificidades de cada floresta inundada.

## 2.5 Conclusão

O padrão de crescimento do tronco na floresta sazonalmente alagáveis do rio Araguaia diferiu do padrão de crescimento das várzeas amazônicas, apresentando redução do incremento de caules no período seco e dormência do tronco no período alagado, mesmo durante o ano ENSO. Alguns grupos específicos de diâmetro de tronco podem ter contribuído para esse padrão.

Os incrementos acumulados do diâmetro do tronco das árvores situadas na parcela não alagada foram superiores aos da parcela sazonalmente alagável nos anos sem

ocorrência de seca (não-ENSO) e após a ocorrência de ENSO (2016/17).

Parte do padrão de crescimento e da taxa de incremento anual do tronco, como também, da ausência de variações nessas variáveis entre os ambientes topográficos mais altos (parcela N-alag) e baixos (parcela Alag) foram explicadas pelas variações nas condições hidroclimáticas e edáficas da floresta nos anos secos.



### 3 CONDIÇÕES HÍDRICAS NO SOLO E EM ÁRVORES DE EM UMA ÁREA SAZONALMENTE ALAGÁVEL

#### 3.1 Introdução

Os ecossistemas da floresta sazonalmente alagáveis são controlados principalmente pela natureza de seu regime hidrológico (pulso de inundação), incluindo períodos de alagamento e seca. Nessas florestas, o regime de cheias é reconhecido como um dos principais condicionantes da estrutura da comunidade florestal e das respostas fisiológicas adaptativas. Porém, o papel dos períodos de seca nas áreas alagáveis tem sido ignorado em grande parte dos estudos, apesar das evidências crescentes de sua importância para os padrões de distribuição de espécies em outras florestas tropicais (ENGELBRECHT *et al.*, 2007; LOPEZ; KURSAR, 2018).

A seca é definida pela disponibilidade insuficiente de água para as plantas, uma consequência do esgotamento da umidade do solo pela baixa precipitação e altas taxas de evapotranspiração. Embora as definições operacionais proponham índices climáticos para a seca pela precipitação e evapotranspiração abaixo dos mínimos específicos do ecossistema (QUIRING, 2009), a severidade da seca geralmente é definida com referência às respostas das plantas (GUTSCHICK; BASSIRIRAD, 2003). Algumas plantas podem experimentar estresse hídrico na seca, que é tolerado ou evitado por mecanismos morfológicos, fisiológicos e fenológicos.

Nas várzeas da Amazônia, o estresse hídrico é causado principalmente pela baixa disponibilidade de umidade do solo em solos siltosos, juntamente com altas taxas de evaporação durante os períodos de seca. A duração da estação seca nas florestas de várzea varia consideravelmente ao longo do gradiente de precipitação na Bacia Amazônica, podendo variar de 1 a 5 meses consecutivos de precipitação abaixo de 100 mm.mês<sup>-1</sup> (PIEPADE *et al.*, 2013).

O período seco coincide com o término do alagamento nas várzeas Amazônicas (WORBES, 1989). No início desse período, o crescimento das plantas pode continuar constante devido a disponibilidade de água no solo. No entanto, a medida que a estiagem progride, reduzir a disponibilidade de água no solo para a planta (PAROLIN *et al.*, 2010). Além disso, os eventos climáticos supra-anuais de ENSO intensificam a estiagem nas várzeas (SCHÖNGART; JUNK, 2007; SCHÖNGART *et al.*, 2004), porque diminuem as chuvas e aumenta a perda de umidade pelo transporte dos ventos e aumento do calor (MARENGO *et al.*, 2008a).

Na região de transição entre os biomas Amazônica e Cerrado, próxima à Ilha do Bananal, que é a maior ilha fluvial do mundo, também encontram-se extensas áreas de florestas sazonalmente alagáveis inseridas na planície de inundação do rio Araguaia. Trabalhos realizados nesse ambiente reportaram reduções expressivas nos fluxos de energia (calor latente), água e assimilação de carbono nos períodos de seca e de alagamento (BORMA et al., 2009; COSTA, 2015; FONSECA et al., 2019).

Para Kurzatkowski et al. (2015), as árvores das florestas sazonalmente alagáveis do rio Araguaia podem sofrer mais com os efeitos das secas sazonais, quando comparadas com as várzeas, por tratar-se de um ambiente submetido a seca bem rigorosa. Essa região apresenta uma sazonalidade típica do Cerrado, com cerca de 5 meses de seca ao ano, período no qual ocorrem índices com menos de 10% de toda a precipitação anual (MARCUIZZO; GOULARTE, 2013). Como o volume de chuvas é reduzido na seca, a principal entrada de água para as plantas nessas florestas ocorre no período chuvoso, e alterações nessa oferta podem aumentar a intensidade da seca no local.

Outro fator agravante na seca é a baixa capacidade de armazenamento e retenção de água dos solos. Como os solos são predominantemente arenosos na planície do Araguaia, a umidade diminui rapidamente nas camadas superficiais, atingindo os menores valores no final do período seco (BORMA et al., 2009). Nesse período, árvores mais sensíveis a redução da umidade podem ser expostas ao estresse hídrico.

As árvores das florestas alagáveis desenvolveram um conjunto de características para lidar com inundações e secas (CHAVES et al., 2003). A eficácia destas adaptações para a tolerância ou evitação à seca pode ser estudada medindo por exemplo, respostas fisiológicas, como a variação do potencial hídrico foliar e o potencial para o ponto de perda de turgor das plantas ( $\Psi_{tlp}$ ).

Como outros estresses ambientais, os eventos de seca têm duração, frequência e gravidade, conforme medidos por uma combinação de dados climáticos e de impacto sobre a produtividade e comportamento fisiológico das plantas. Para esses propósitos, considera-se o estresse hídrico como uma disponibilidade insuficiente de água (em termos de potencial hídrico) para sustentar o metabolismo normal das plantas (LICHTENTHALER, 1998).

Neste contexto, no presente trabalho investigou-se a disponibilidade de água no solo em uma floresta sazonalmente alagável na planície do rio Araguaia e, as respostas das plantas aos efeitos potenciais da seca (deficiência de água) nos períodos secos sazonais e no período seco prolongado de 2015/16 (ano de ENSO). Aqui abordou-

se três questões principais: (1) A disponibilidade de água nos solos, principalmente durante a seca, atende as necessidades das plantas? (2) A amplitude do potencial hídrico no solo coincide com o limite de operação hidráulica das plantas (em termos de potencial hídrico foliar)? (3) O limite de operação hidráulica das plantas (potencial hídrico foliar e  $\Psi_{tlp}$ ) é maior nos ambientes alagáveis?

A partir dos resultados obtidos, discutem-se a disponibilidade de água no solo, e os níveis e possíveis estratégias (tolerância ou evitação) de resistência à seca no ambiente estudado.

## 3.2 Materiais e Métodos

### 3.2.1 Local de estudo

O presente trabalho foi realizado no sítio Javaesinho, sítio JAV, uma das áreas de estudo do Programa LBA. O sítio JAV está localizado no Parque estadual do Cantão (coordenadas 09°49'16,1"S e 50°08'55,3"O), no Estado do Tocantins (Figura 1.7). O solo predominante no sítio JAV é do tipo arenoso hidromórfico (Glei húmico) (BORMA et al., 2009), composto em sua maior parte por areias quartzosas e sedimentos depositados pelos rios Javaés e Araguaia (AQUINO et al., 2008; LATRUBESSE; STEVAUX, 2002).

Em termos climáticos, a região apresenta clima úmido-subúmido com moderada deficiência hídrica no inverno. O período seco ocorre de maio a setembro, quando a umidade relativa média atinge cerca de 40%, e o período chuvoso ocorre de outubro a abril, com umidade relativa média da ordem de 85% (COSTA, 2015; MARCUZZO; GOULARTE, 2013). Cerca de 90% da precipitação anual ocorre durante o período chuvoso. Entre janeiro e abril, devido à associação entre elevada pluviosidade e planície aluvial, a região é afetada por inundações anuais (JUNK, 1993), com nível d'água variando entre 1 a 5 m acima da superfície do terreno (ver Borma et al. (2009) e Costa (2015)).

Em relação a vegetação, embora o sítio esteja localizado em uma região de transição Floresta amazônica e Cerrado, a vegetação predominante é típica do Cerrado (TOCANTINS, 2016). Por isso, Junk et al. (2013) classificou a região como cerrado sazonalmente alagável.

### 3.2.2 Coleta de amostras e estratégia experimental

A presente pesquisa foi realizada em duas parcelas experimentais de 100 x 100 m, sendo (1) uma área sazonalmente alagada (parcela Alag) e outra (2) área não alagável (parcela N-alag), e no entorno da torre micrometeorológica, como mostra a Figura 1.12.

Nas parcelas realizou-se uma série de atividades de campo para determinar a disponibilidade de água no solo, em termos de potencial hídrico, para o período de 2004 a 2015 e, no ano de ENSO (2015/16), principalmente no período seco sazonal, e comparou-se com os limites hidráulicos de tolerância das árvores (ponto de perda de turgor e potencial hídrico foliar). Para isso, foram coletados dados de precipitação e umidade do solo, onde analisou-se as condições físico-químicas do solo e sua capacidade de armazenamento e retenção de água, por meio de dados estimados de potencial mátrico.

Investigou-se também o potencial hídrico foliar no ponto de perda de turgor de árvores localizadas em ambientes alagáveis (parcela Alag e entorno da torre) e não alagáveis (parcela N-alag e próximo da torre), como também, o potencial hídrico foliar ao longo do dia no início e no final do período seco de 2015/16. No mesmo período, foi monitorado a variação diária do tronco para compreender a variação do fluxo de água nas plantas.

#### 3.2.2.1 Dados de precipitação e umidade do solo

Entre novembro de 2015 a outubro de 2016 ocorreram várias falhas no monitoramento da precipitação na torre micrometeorológica. Nesse caso para representar a precipitação na região de estudo utilizou-se dados do produto 3B43 versão 3 do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) disponível em [Huffman et al. \(2017\)](#), para representar o volume de chuvas, tanto para o período observado, novembro de 2015 a outubro de 2016, quanto para a média a longo prazo do local (outubro de 2004 a setembro de 2015).

A umidade do solo foi monitorada utilizando refletômetros FDR instalados no sítio JAV nas seguintes profundidades: 20, 40, 80, 150 e 293 cm (Figuras 1.9 e 1.10). Os dados de umidade do solo foram estimados utilizando uma calibração polinomial de solos argilosos sob uma área de floresta ([BORMA et al., 2009](#); [ROCHA et al., 2004](#)). Estes dados foram disponibilizados pelo [Universidade de São Paulo \(2017\)](#), para o período de outubro de 2004 a novembro de 2016.

Importante destacar que optou-se por excluir os dados de precipitação e de umidade do solo obtidos no período de outubro de 2015 a setembro de 2016 do cálculo da média, uma vez que esse período foi atípicamente secos, em decorrência de uma forte seca causada por El Niño que afetou a Amazônia como um todo (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016).

### 3.2.2.2 Coleta de solos

Foram coletadas amostras de solo deformadas nas duas parcelas estudadas (parcelas Alag e N-Alag) e no entorno da torre micrometeorológica para determinação da composição química e física, perfazendo um total de três pontos amostrais. As amostras das parcelas Alag e N-alag foram coletadas nas seguintes profundidades: 0 - 10 cm; 10 - 40 cm; 100 - 110 cm; 140 - 150 cm; e 190 - 200 cm. No entorno da torre, as amostras foram coletadas nas profundidades: 20 cm; 40 cm; 80 cm; 150 cm; 220 cm e 290 cm. Em cada ponto amostral coletou-se uma amostra por profundidade.

Os parâmetros físicos analisados compreenderam, análise de textura e classificação textural do solo (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 1997), enquanto os parâmetros químicos do solo foram, análises de pH, concentração de macronutrientes e cátions, soma de bases, capacidade de troca de cátions e teor de matéria orgânica, seguindo a metodologia estabelecida pela (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 1997).

As análises físico-químicas foram realizadas no Laboratório Agropecuário Zoofértil, em Palmas-TO, e no Laboratório de Solos do Departamento de solos da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG.

#### *Características físico-química dos solos*

A análise física dos solos nas três localidades estudadas (na base da torre e nas parcelas alagável e não alagável) estão apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2. O solo predominantemente argiloso na superfície (0 - 40 cm) da parcela Alag, com teor de argila médio de 57,7%.

A parcela N-alag apresenta camada superficial (0 - 40 cm) mais arenosa (média de 81%; Tabela 3.1). A partir do segundo metro de profundidade, ambos os perfis apresentam predominância de material arenoso, e tendência de aumento do teor de areia com a profundidade.

Tabela 3.1 - Classificação textural dos solos das parcelas sazonalmente alagável (Alag) e não alagável (N-Alag), sítio JAV, Tocantins, Brasil. Legenda: Class. USDA = classe textural segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture - USDA*).

| Parcela | Prof.<br>cm | Areia   | Silte | Argila | Class. USDA           |
|---------|-------------|---------|-------|--------|-----------------------|
|         |             | ———%——— |       |        |                       |
| Alag    | 0-10        | 33,0    | 11,0  | 56,0   | Argila                |
|         | 10-40       | 31,0    | 10,0  | 59,0   | Argila                |
|         | 100-110     | 50,0    | 9,0   | 41,0   | Argila arenosa        |
|         | 140-150     | 66,0    | 7,0   | 27,0   | Franco argilo arenosa |
|         | 190-200     | 82,0    | 5,0   | 13,0   | Areia franca          |
| N-Alag  | 0-10        | 83,0    | 5,0   | 12,0   | Areia franca          |
|         | 10-40       | 79,0    | 5,0   | 16,0   | Franco arenosa        |
|         | 100-110     | 60,0    | 8,0   | 32,0   | Franco argilo arenosa |
|         | 140-150     | 71,0    | 6,0   | 23,0   | Franco argilo arenosa |
|         | 190-200     | 68,0    | 8,0   | 24,0   | Franco argilo arenosa |

Fonte: Produção do autor.

Na base da torre, o perfil de solo entre 20 e 150 cm de profundidade é constituído predominantemente por argila (56 a 62%). Nas camadas de 220 a 290 cm, a textura é predominantemente arenosa (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Propriedades físicas - textura, porosidade e densidade do perfil de solo na base da torre, sítio JAV, Tocantins, Brasil. Legenda: Class. USDA = classe textural segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture - USDA*).

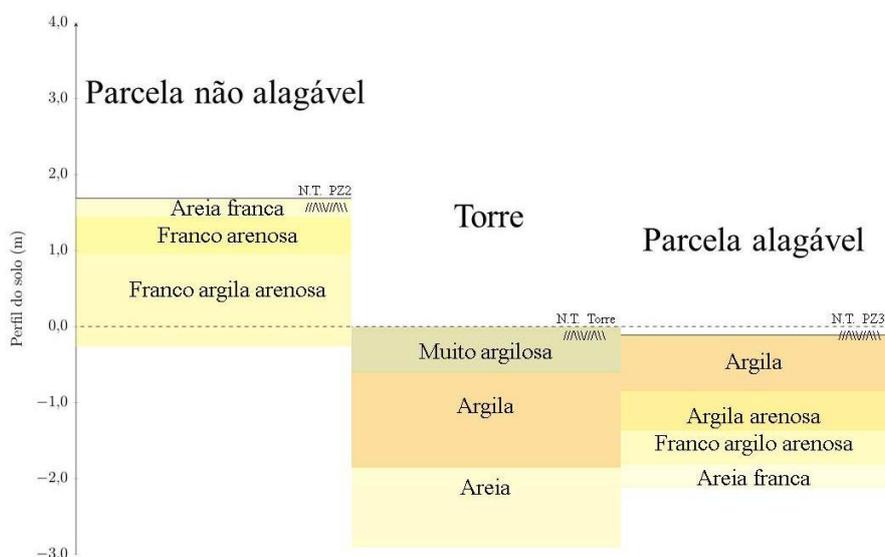
| Prof.<br>cm | Areia   | Silte | Argila | Ma      | Mi    | Vpt   | Dens               | Class. USDA    |
|-------------|---------|-------|--------|---------|-------|-------|--------------------|----------------|
|             | ———%——— |       |        | ———%——— |       |       | g.cm <sup>-3</sup> |                |
| 20          | 2,3     | 35,4  | 62,3   | 5,60    | 46,36 | 51,96 | 1,40               | Muito argilosa |
| 40          | 1,3     | 36,4  | 62,3   | 5,24    | 43,96 | 49,21 | 1,49               | Muito argilosa |
| 80          | 1,2     | 38,8  | 60,0   | 6,14    | 46,69 | 52,83 | 1,69               | Argila         |
| 150         | 9,5     | 34,4  | 56,1   | 5,03    | 42,80 | 47,83 | 1,46               | Argila         |
| 220         | 90,9    | 5,0   | 4,1    | -       | -     | -     | -                  | Areia          |
| 290         | 92,4    | 2,6   | 5,0    | -       | -     | -     | -                  | Areia          |

Ma - macroporosidade, Mi - microporosidade, e Vpt - volume de poros totais.

Fonte: Produção do autor.

Os níveis dos terrenos nos pontos amostrados são de: 156,2 m; 154,2 m; e 153,9 m, parcela N-alag, base da torre e parcela Alag, respectivamente. Utilizando a base da torre como nível zero, nota-se que parcela N-alag está localizada nos níveis topográficos mais altos, nos mais baixos encontramos a torre micrometeorológica e a parcela Alag, como mostra a Figura 3.1.

Figura 3.1 - Representação dos perfis amostrados (parcela não alagável, base da torre micrometeorológica, e parcela sazonalmente alagável) e respectivas classes texturais, utilizando a base da torre como nível zero.



Fonte: Produção do autor.

A caracterização química (Tabelas 3.3 e 3.4) mostrou um solo com acidez elevada ( $\text{pH} < 4,0$ ) em todo perfil da parcela Alag; na parcela N-alag, a acidez foi maior na profundidade de 0 a 110 cm, ou seja, na sua maior parte constituído pela fração argila.

A concentração dos nutrientes - P, Ca, Mg e K - foi baixa em ambas as parcelas, indicando solos com baixa fertilidade natural. Em relação à soma de bases (SB), a média do perfil para a área sazonalmente alagável foi bem menor ( $1,8 \text{ cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ ), comparado com a parcela N-alag ( $3,5 \text{ cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ ).

Em geral a parcela Alag exibiu valores de capacidade de troca de cátions potencial a  $\text{pH} 7,0$  (T;  $\text{CTC}_{\text{pH } 7}$ ) menores do que na parcela N-alag, cuja média foi de 11,4 e  $18,3 \text{ cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ , respectivamente.

Tabela 3.3 - Caracterização química dos solos na base da torre, sítio JAV.

| Prof.<br>cm | pH<br>H <sub>2</sub> O | pH<br>KCl | P<br>mg.dm <sup>-3</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Al <sup>3+</sup> | cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> |     |     | T   | V    | m<br>% | TMO |
|-------------|------------------------|-----------|--------------------------|----------------|------------------|------------------|------------------|-------------------------------------|-----|-----|-----|------|--------|-----|
|             |                        |           |                          |                |                  |                  |                  | H + Al                              | SB  | t   |     |      |        |     |
| 20          | 5,4                    | 4,2       | 0,6                      | 0,0            | 1,1              | 0,1              | 0,9              | 3,8                                 | 1,2 | 2,1 | 5,0 | 23,8 | 43,1   | 1,6 |
| 40          | 5,3                    | 4,2       | 0,1                      | 0,0            | 0,5              | 0,0              | 0,5              | 3,1                                 | 0,6 | 1,1 | 3,7 | 15,3 | 47,2   | 1,1 |
| 80          | 5,2                    | 4,3       | 0,0                      | 0,0            | 0,3              | 0,0              | 0,4              | 4,0                                 | 0,3 | 0,7 | 4,3 | 6,3  | 59,7   | 1,1 |
| 150         | 5,0                    | 4,5       | 0,0                      | 0,0            | 0,2              | 0,0              | 0,1              | 2,5                                 | 0,2 | 0,3 | 2,7 | 7,4  | 33,3   | 0,3 |
| 220         | 5,2                    | 4,9       | 0,0                      | 0,0            | 0,2              | 0,0              | 0,0              | 2,0                                 | 0,2 | 0,2 | 2,2 | 9,9  | 0,0    | 0,4 |

SB - soma de bases, t ou CTC<sub>efetiva</sub> - capacidade de troca de cátions efetiva, T ou CTC<sub>pH 7,0</sub> - capacidade de troca de cátions potencial no pH=7, V - porcentagem de saturação por bases da CTC<sub>pH 7,0</sub>, m - porcentagem de saturação por alumínio, TMO - teor de matéria orgânica.

Fonte: Produção do autor.

82

Tabela 3.4 - Caracterização química dos solos nas parcelas sazonalmente alagável e não alagável.

| Parcela | Prof.<br>cm | pH<br>CaCl <sub>2</sub> | P<br>mg.dm <sup>-3</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Al <sup>3+</sup> | cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> |     |      | T    | V    | m<br>% | TMO |
|---------|-------------|-------------------------|--------------------------|----------------|------------------|------------------|------------------|-------------------------------------|-----|------|------|------|--------|-----|
|         |             |                         |                          |                |                  |                  |                  | H + Al                              | SB  | t    |      |      |        |     |
| Alag    | 0-10        | 3,8                     | 5,0                      | 0,2            | 0,8              | 0,4              | 1,0              | 5,8                                 | 1,4 | 2,4  | 7,2  | 19,9 | 41,0   | 0,7 |
|         | 10-40       | 3,7                     | 2,4                      | 0,2            | 0,5              | 0,4              | 2,9              | 8,0                                 | 1,1 | 4,0  | 9,1  | 11,7 | 73,2   | 0,1 |
|         | 100-110     | 3,8                     | 1,5                      | 0,2            | 1,2              | 0,6              | 4,4              | 17,5                                | 2,0 | 6,4  | 19,5 | 10,4 | 68,3   | 0,1 |
|         | 140-150     | 3,9                     | 1,8                      | 0,2            | 1,5              | 0,5              | 2,2              | 8,0                                 | 2,2 | 4,4  | 10,2 | 21,4 | 50,2   | 0,2 |
|         | 190-200     | 3,9                     | 1,2                      | 0,1            | 1,6              | 0,7              | 3,0              | 8,4                                 | 2,4 | 5,4  | 10,8 | 22,4 | 55,4   | 0,2 |
| N-Alag  | 0 a 10      | 3,6                     | 3,7                      | 0,4            | 0,5              | 0,3              | 5,1              | 24,0                                | 1,2 | 6,3  | 25,2 | 4,7  | 81,2   | 0,4 |
|         | 10-40       | 3,4                     | 2,1                      | 0,1            | 1,5              | 0,6              | 11,0             | 31,3                                | 2,2 | 13,2 | 33,5 | 6,6  | 83,3   | 0,3 |
|         | 100-110     | 3,6                     | 0,3                      | 0,1            | 2,8              | 1,0              | 4,3              | 15,8                                | 3,9 | 8,2  | 19,7 | 19,8 | 52,4   | 0,2 |
|         | 140-150     | 5,3                     | 3,0                      | 0,1            | 4,7              | 1,4              | 0,0              | 1,5                                 | 6,2 | 6,2  | 7,7  | 80,5 | 0,0    | 0,1 |
|         | 190-200     | 5,1                     | 2,7                      | 0,1            | 2,8              | 1,2              | 0,0              | 1,2                                 | 4,1 | 4,1  | 5,3  | 77,1 | 0,0    | 0,1 |

SB - soma de bases, t ou CTC<sub>efetiva</sub> - capacidade de troca de cátions efetiva, T ou CTC<sub>pH 7,0</sub> - capacidade de troca de cátions potencial no pH=7, V - porcentagem de saturação por bases da CTC<sub>pH 7,0</sub>, m - porcentagem de saturação por alumínio, TMO - teor de matéria orgânica.

Fonte: Produção do autor.

Na parcela Alag, a  $CTC_{pH\ 7}$  apresentou ligeiro aumento com a profundidade, enquanto na parcela N-alag observou-se um comportamento oposto. No entanto, em ambas as parcelas, as camadas nas quais a  $CTC_{pH\ 7}$  foi elevada foram aquelas com maior percentual de argila e também maior concentração de alumínio trocável. O teor de matéria orgânica (TMO) variou entre 0,4 a 0,7 % nas camadas superiores do solo das parcelas estudadas, assim como reduções contínuas com o aumento da profundidade, variaram entre 0,1 a 0,2 %.

Em geral, os solos das parcelas estudadas são predominantemente arenosos, ácidos, com elevada concentração de alumínio trocável, e baixa concentração de nutrientes e matéria orgânica. O teor de nutrientes da camada superficial (0 a 10 cm) foi maior na parcela Alag do que na parcela N-alag. No entanto, nessa parcela essa concentração rapidamente diminui para os menores valores (0,1 %) enquanto que na parcela N-alag essa diminuição é mais gradativa, passando para 0,1 % somente nas camadas abaixo de 110 cm de profundidade.

### **3.2.3 Ensaios de sucção dos solos**

No entorno da torre micrometeorológica também foram coletadas amostras de solo indeformadas para determinação da distribuição de tamanho dos poros no solo e densidade do solo. A coleta foi realizada apenas nesse local porque os sensores de umidade do solo estavam instalação no entorno da torre e, o sítio JAV não dispões de outros equipamentos do tipo nas parcelas experimentais.

Durante as coletas, foram extraídos blocos cilíndricos de solo com estrutura indeformada utilizando cilindros de aço inoxidável de 0,12 m de altura e 10 cm de diâmetro. O solo foi retirado de uma área de 1,5 m largura x 1,5 m comprimento, a uma profundidade de 300 cm da superfície. No perfil do solo foram coletadas 3 amostras nas profundidade 20, 40, 80 e 180 cm, perfazendo um total de 12 amostras. Abaixo de 240 cm de profundidade, a textura alterava abruptamente para predominantemente arenosa, impedindo a moldagem do solo nos cilindros, por quebra excessiva das amostras, nessas profundidades.

A partir dos blocos de solo obtidos, foram esculpidas amostras indeformadas cilíndricas de 0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura para os ensaios na câmara de pressão de Richards e de aproximadamente 0,05 m de diâmetro. À medida que os blocos de solo eram desbastados até atingirem o diâmetro definido, cilindros plásticos rígidos eram encaixados nas amostras para possibilitar o processo de saturação destas. Uma vez confeccionadas as amostras, efetuaram-se medidas de diâmetro e de altura, com

paquímetro, para determinar o volume das mesmas.

Doze das amostras indeformadas, com as características anteriormente descritas, foram submetidas ao ensaio com a câmara de pressão de Richards (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 1997), sendo utilizadas as pressões de 0, 10, 30, 60, 100, 300, 500, 1.000 e 1.500 kPa. Este ensaio foi realizado pelo Laboratório de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ - Universidade de São Paulo, *Campus* de Piracicaba.

### 3.2.4 Medidas de potencial hídrico foliar no período seco sazonal e ponto de perda de turgor

As medidas de potencial hídrico foliar no período seco sazonal e ponto de perda de turgor foram realizadas nos mesmos indivíduos amostrados, sendo 6 (seis) árvores (indivíduos) localizadas em ambiente sazonalmente alagável, sendo 2 (dois) indivíduos na parcela Alag (*Maquira guianensis* e *Brosimum gaudichaudii*) e 4 (quatro) indivíduos no entorno da torre micrometeorológica *Cariniana rubra*, *Duroia genipodes*, *Piranhea trifoliata*, e *Tachigali aurea*; e 5 (cinco) indivíduos localizadas em ambiente não alagável, desse 4 (quatro) encontram-se na parcela N-alag (*Eschweilera nana*, *Licania egleri*, *Licania hypoleuca* e *Micropholis guyanensis*) e 1 (um) indivíduo situado próximo da torre (*Tachigali* sp.). A unidade amostral dessas avaliações foi a nível de indivíduos por ambiente (alagável e não alagável).

A princípio, a seleção dos indivíduos seria restrita as parcelas experimentais, porém devido a ausência de sensores de umidade do solo nesses locais, alguns indivíduos localizados no entorno e próximo da torre micrometeorológica (onde os sensores de FDR's estão instalados) e que possuíam essas medidas, foram adicionados na análise.

#### *Potencial hídrico foliar*

Para realizar as medidas de potencial hídrico foliar, foi coletado 1 (um) galho das regiões superiores do dossel com comprimento aproximado de 30 cm. Após a coletas, os galhos foram acondicionados em sacos plásticos pretos durante alguns minutos, visando estabilizar o potencial hídrico em todas as partes do material vegetal. Após a estabilização, foi realizada a medida do potencial hídrico de 2 (duas) folhas por galho em uma câmara de pressão “tipo Scholander” (PMS Instrument Co., Corvallis, OR, USA), segundo o método descrito por Turner (1981).

As medidas foram realizadas no início e no final do período seco do ano hidrológico 2015/16, em maio/2016 e outubro/2016, respectivamente, nos seguintes horários:

7h, 10h, 12h, 14h e, 16h.

#### *Ponto de perda de turgor*

O ponto de perda de turgor  $\Psi_{tlp}$  foi calculado a partir da curva de pressão-volume. O método consistiu na coleta de folhas no período da manhã, em seguida, seleção e, acondicionamento das folhas em um recipiente com água por no mínimo, 24 h.

Após hidratadas, as folhas foram pesadas rapidamente em balança semi-analítica (Shimatzu, Modelo BL320H) e conduzidas a câmara de pressão para medir o potencial hídrico. O procedimento de pesagem e medição do potencial prosseguiu até o momento em que se observou que o incremento de pressão não mais produziu qualquer exsudação da seiva xilemática. O ajuste da curva de pressão-volume foi realizado segundo a metodologia proposta por [Schulte e Hinckley \(1985\)](#). As análises foram realizadas nos meses de maio de 2016 e junho de 2017.

### **3.2.5 Análise dos dados**

#### **3.2.5.1 Precipitação, umidade do solo e potencial hídrico**

Os dados de precipitação e umidade do solo do período observado (novembro de 2015 a outubro de 2016) foram comparados com as respectivas médias de longo prazo, calculado para o período de outubro de 2004 a setembro de 2015. Esses anos compreenderam todos os anos hidrológicos com dados hidroclimáticos registrados no sítio JAV, desde sua instalação. Optou-se por excluir o período observado do cálculo da média por se tratar de um período anormalmente seco.

Os dados de potenciais de água no solo foram estimados utilizando o método da curva característica de retenção de água no solo. A partir dos dados obtidos nos ensaios de sucção para determinar a curva de retenção de água no solo, utilizou-se um modelo matemático proposto por van Genuchten em 1980 ([VAN GENUCHTEN, 1980](#)) para representar essa relação:

$$\theta = \theta_s + (\theta_r - \theta_s) \cdot \left[ \frac{1}{1 + (\alpha \cdot \Psi)^n} \right]^m \quad (3.1)$$

com  $m = 1 - \frac{1}{n}$ , sendo  $\theta$  a umidade volumétrica,  $\Psi$  o potencial matricial,  $\theta_r$  e  $\theta_s$ , respectivamente, a umidade volumétrica residual e na saturação e  $n$  e  $\alpha$  parâmetros de ajuste.

A curva características foi ajustada utilizando o *programa RETC*. Entre as configurações disponíveis no programa, foi selecionado aquela que apresentou o maior valor para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), para o conjunto de dados observados, sendo considerada o ajuste melhor dos parâmetros da curva.

Com base nos parâmetros da curva característica, estimou-se os potenciais matriciais (aqui denominados, potenciais hídricos) utilizando os dados de umidade volumétrica do solo estimados pelos FDR's nas profundidades 20, 40, 80 e 150 cm.

### **3.2.5.2 Planta**

As medidas de  $\Psi_{t1p}$  e de potencial hídrico foliar foram comparadas com os potenciais de água no solo por meio da análise gráfica das dispersões dos dados e teste de hipótese para dados não paramétricos (Teste Kruskal Wallis) a 5 % de probabilidade, com comparação de grupos pelo método de Simes-Hochberg (SH), utilizando um programa estatístico *Action Stat*, desenvolvido pela Estatcamp - Consultoria Estatística e Qualidade, no Brasil.

## **3.3 Resultados**

### **3.3.1 Capacidade de retenção e armazenamento de água**

Os resultados das curvas de retenção de umidade, expressos em termos dos parâmetros de van Genuchten, estão apresentados na Tabela 3.5. Esses ensaios foram feitos somente para as camadas acima de 150 cm, tendo em vista que as camadas abaixo dessa profundidade eram predominantemente arenosas.

Tabela 3.5 - Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de umidade pela equação de van Genuchten.

| Prof<br>cm | $\theta_s$ | $\theta_r$ | $\alpha$ | m      | n      | $\theta_s - \theta_r$ | $\theta_{10}$ | $\theta_{1500}$ | AD<br>mm | AD <sub>máx</sub><br>mm |
|------------|------------|------------|----------|--------|--------|-----------------------|---------------|-----------------|----------|-------------------------|
| 20         | 0,5201     | 0,3470     | 0,3957   | 0,3874 | 1,0050 | 0,1731                | 0,4400        | 0,3614          | 24       | 156                     |
| 40         | 0,4834     | 0,2834     | 0,1839   | 0,3367 | 1,0050 | 0,2000                | 0,3728        | 0,3093          | 19       | 145                     |
| 80         | 0,5289     | 0,3170     | 0,3515   | 0,3199 | 1,2453 | 0,2119                | 0,4379        | 0,3344          | 57       | 291                     |
| 150        | 0,4774     | 0,2978     | 0,0840   | 0,8966 | 1,0050 | 0,1796                | 0,4018        | 0,3001          | 71       | 334                     |
| Total      |            |            |          |        |        |                       |               |                 | 171      | 926                     |

$\theta_s$  e  $\theta_r$  referem-se a umidade volumétrica na saturação, e residual, respectivamente; n, m e  $\alpha$  são parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten;  $\theta_{10}$  é a umidade volumétrica correspondente na tensão 10 kPa e,  $\theta_{1500}$  a umidade volumétrica na tensão 1.500 kPa; AD é o volume de água disponível na camada, e AD<sub>máx</sub> é o volume máximo de água disponível.

Fonte: Produção do autor.

A avaliação dos parâmetros da curva de retenção permite uma estimativa da disponibilidade de água na profundidade de solo considerada. Os valores de  $\theta_s$  e  $\theta_r$  indicam a capacidade máxima (umidade saturada) e mínima (umidade residual) de umidade no solo. Os valores de  $\theta_s$  variaram de 0,48 a 0,53 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>. Os valores de  $\theta_r$  variaram de 0,28 a 0,35 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>, que correspondem a potenciais variando de 2,98.10<sup>26</sup> a 1,09.10<sup>11</sup>kPa, respectivamente.

Nas últimas colunas da Tabela 3.5 apresenta-se a água disponível em cada camada (calculada como o produto de  $\theta_s - \theta_r$  pela espessura da camada) e a quantidade máxima de água armazenada em cada camada, calculada como o produto da porosidade total (V<sub>p</sub>t; Tabela 3.2) pela espessura de cada camada. Observa-se que, enquanto que uma camada de 185 cm de espessura armazena 926 mm de água, somente 171 mm, ou seja, 18,5 % estão de fato disponíveis para as plantas em tensões que elas são capazes de exercer. Isso tomando-se como referência o ponto de mucha permanente ocorrendo a 1.500 kPa.

### 3.3.2 Potenciais hídricos no solo

A Figura 3.2 apresenta a variação intra-anual dos potenciais hídricos diários médios no solo em diferentes profundidades (20, 40, 80 e 150 cm), calculado para o período de outubro de 2004 a setembro de 2015. Os valores médios de umidade volumétrica diária e de potenciais hídricos diários foram calculados para cada 15 dias, já os

valores de precipitação acumulada foram calculadas para cada mês.

Em linhas gerais, o potencial hídrico no solo aumenta no início do período chuvoso em todas as profundidades avaliadas, acompanhando o retorno das chuvas (Figura 3.2a). Entre meados de janeiro e junho, o solo atinge os potenciais hídricos máximos, quando o ambiente é submetido ao alagamento sazonal. Após esse período, o potencial diminui progressivamente (julho a novembro). Os menores potenciais médios registrados no primeiro metro de profundidade foram:  $-1,1 \times 10^{10}$ ;  $-3,0 \times 10^{26}$ ; e  $-3,4 \times 10^{11}$  kPa, nas camadas a 20, 40 e 80 cm, respectivamente, entre julho e outubro. No segundo metro de profundidade, representado pela camada a 150 cm de profundidade, o potencial reduz apenas em novembro até -2,8 kPa e, nos demais meses, o solo permanece saturado (0 kPa).

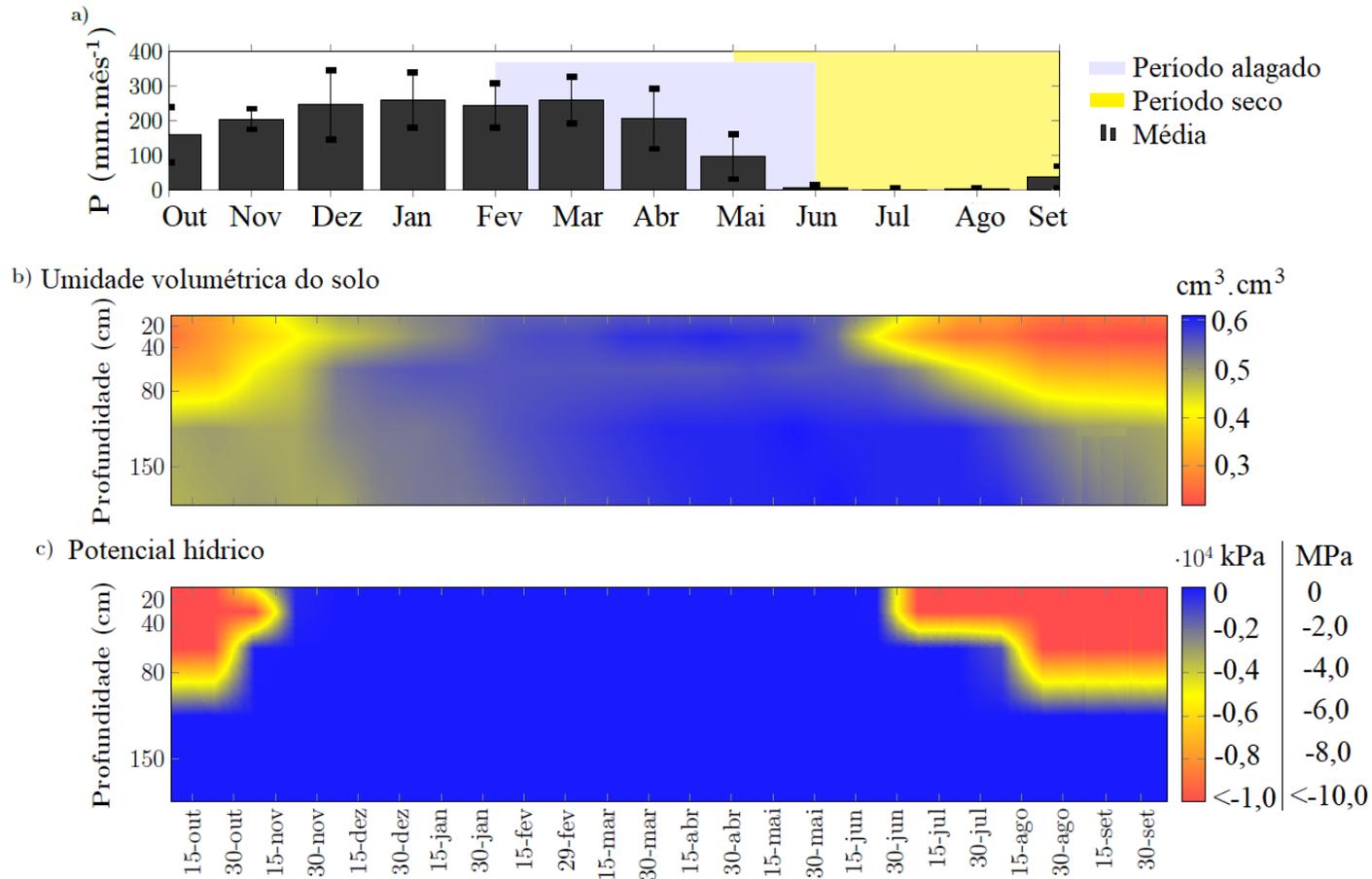
A Figura 3.3 apresenta os potenciais hídricos no solo durante o período observado, de novembro de 2015 a novembro de 2016. Apesar das falhas nos registros dos dados, os valores disponíveis representaram bem a variação dos potenciais entre o início do período chuvoso até início do período seco de 2015/16, e entre o final do período seco de 2015/16 até início do período chuvoso de 2016/17.

Em 2015/16 foram observadas diminuições expressivas na precipitação durante o período chuvoso e, um prolongamento no número de meses secos (ou seja, 7 meses com chuva acumulada mensal  $< 100$  mm, em comparação o esperado, que seria de 5 meses; Figura 3.3a).

As irregularidades na precipitação refletiram nos potenciais de água no solo. Geralmente, potenciais acima de 1.000 kPa são alcançados em dezembro (Figura 3.2c), porém no período chuvoso de 2015/16, esse limiar foi alcançado apenas em janeiro/16 (Figura 3.3c). Outra alteração observada foi a redução do período em que o solo permanece saturado, de 5 para 3 meses (meados de fevereiro a meados de maio). O período alagado de 2015/16, aqui representado pela submersão do solo, durou cerca de 2 meses (meados de fevereiro a meados de abril, monitoramento *in situ*).

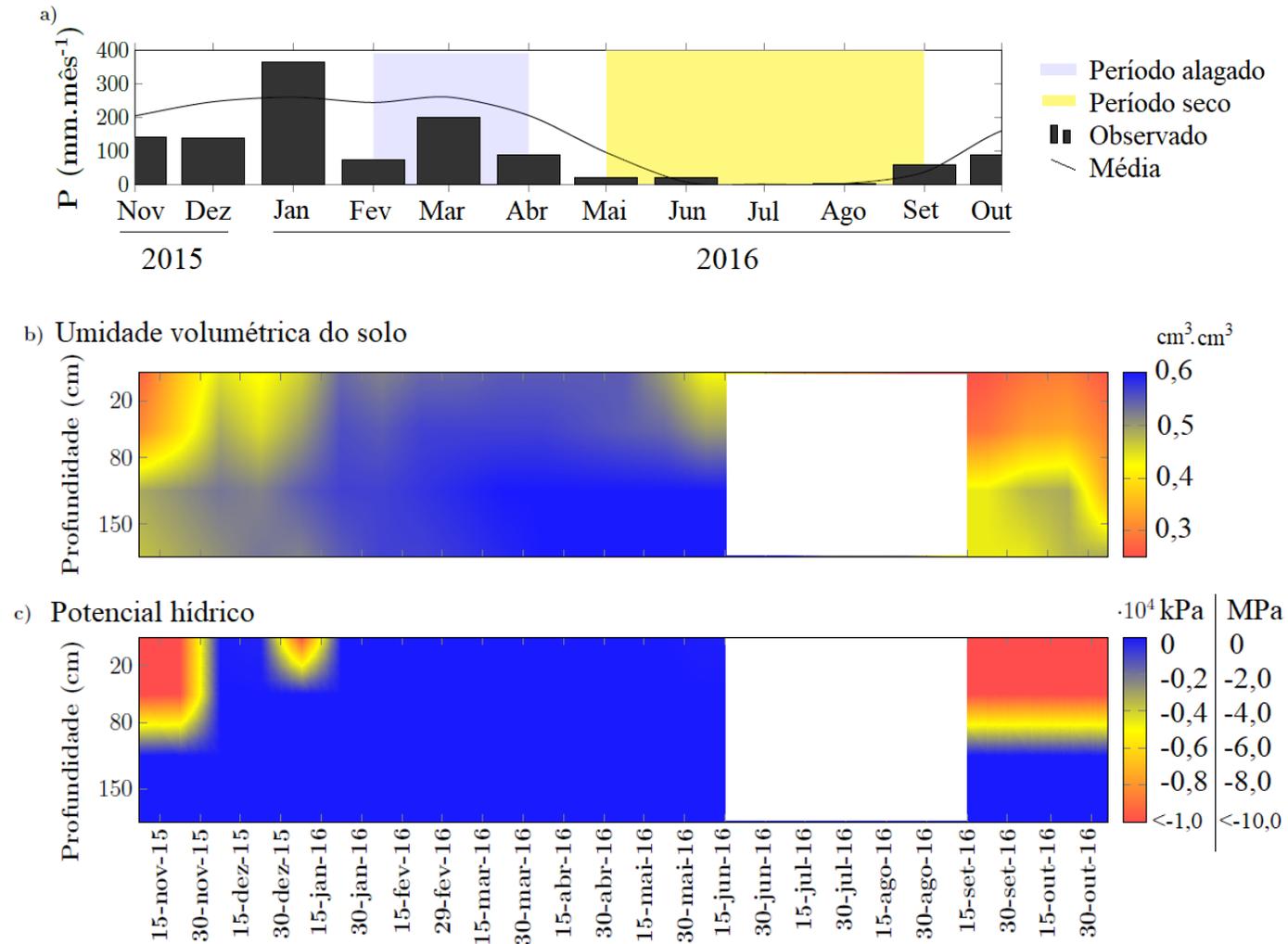
Após o alagamento, normalmente, a redução do potencial hídrico no solo inicia em junho, cerca de uma semana após o final do período alagado (Figura 3.2c). Porém em 2015/16, a redução do potencial foi antecipada em um mês (maio/2016), na camada a 20 cm de profundidade. Na camada a 80 cm de profundidade essa redução iniciou junho/2016. No mesmo mês o solo a 150 cm de profundidade permaneceu saturado.

Figura 3.2 - Valores médios de precipitação acumulada (P), umidade volumétrica diária do solo e potenciais hídricos diários em diferentes profundidades do solo (20, 40, 80 e 150 cm), calculados para o período de outubro de 2004 a setembro de 2015 (média a longo prazo)



Fonte: Produção do autor.

Figura 3.3 - Precipitação acumulada mensal (P), umidade volumétrica diária do solo e potenciais hídricos diários em diferentes profundidades do solo (20, 40, 80 e 150 cm) para o período observado (novembro de 2015 a outubro de 2016)



Fonte: Produção do autor.

Entre junho e setembro/2016 o monitoramento no perfil do solo foi interrompido por falhas no fornecimento de energia. Na camada a 40 cm de profundidade o monitoramento foi interrompido em abril/2016 devido falhas no funcionamento do sensor. Quando o monitoramento foi reiniciado em setembro (final do período seco de 2015/16), os potenciais no primeiro metro do solo foram de:  $-1,1 \times 10^{10}$  e  $-3,4 \times 10^{11}$  kPa, nas camadas 20 e 80 cm, respectivamente, semelhante a média a longo prazo (Figura 3.2). No mesmo período, o potencial mínimo no segundo metro do solo foi de -9,2 kPa (150 cm), cerca de 70% menor (-6,4 kPa), comparado com a média (2,8 kPa).

Em linhas gerais, os potenciais de água no solo no ano de ENSO exibiram períodos prolongados de recarga e, redução na permanência de solo saturado nos períodos chuvoso e alagado. No início do período seco, a perda de água foi antecipada em cerca de um mês, no primeiro metro do solo. Até início de junho, o solo apresentava potenciais hídricos acima do ponto de muita permanente (PMP; 1.500 kPa) ao longo do perfil estudado. No final desse período, a perda de água no primeiro metro do solo alcançou os mesmos potenciais mínimos da média (abaixo do PMP), mas no segundo metro de profundidade, o potencial hídrico permaneceu acima do PMP, ou seja, acessível para as plantas.

### **3.3.3 Potenciais hídricos foliares**

#### **3.3.3.1 Ponto de perda de turgor e potenciais hídricos nas árvores**

A Tabela 3.6 apresenta os potenciais hídricos foliares ( $\Psi_{\text{foliar mín}}$  e  $\Psi_{\text{foliar máx}}$ ) no início e no final do período seco sazonal de 2015/16 e o ponto de perda de turgor ( $\Psi_{\text{tlp}}$ ), nos ambientes alagável e não alagável. Os símbolos (\*) com a mesma cor destacam os valores estatisticamente diferentes entre si, pelo teste de Kruskal Wallis (KW) a 5% de significância.

Os valores de  $\Psi_{\text{tlp}}$  foram estatisticamente diferente entre os ambientes sazonalmente alagável e não alagável (KW=4,03; p=0,04), como mostra a Tabela 3.6. Esse resultado indica que o grupo de árvores submetidas ao alagamento apresenta maior tolerância à seca, quando comparado com as árvores localizadas em ambiente que não alaga.

Tabela 3.6 - Ponto de perda de turgor ( $\Psi_{tlp}$ ), potencial hídrico foliar diário máximo ( $\Psi_{foliar\ máx}$ ) e mínimo ( $\Psi_{foliar\ mín}$ ) no início e final do período seco do ano hidrológico 2015/16, nos ambientes sazonalmente alagável (Alag) e não alagável (N-Alag), sítio JAV.

| Ambiente     |        | $\Psi_{tlp}$<br>(MPa) | Período seco sazonal (MPa) |                      |                      |                      |                      |                      |
|--------------|--------|-----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|              |        |                       | Início                     |                      | Final                |                      | Início-Final         |                      |
|              |        |                       | $\Psi_{foliar\ máx}$       | $\Psi_{foliar\ mín}$ | $\Psi_{foliar\ máx}$ | $\Psi_{foliar\ mín}$ | $\Psi_{foliar\ máx}$ | $\Psi_{foliar\ mín}$ |
| Alag (n=6)   | Média  | -1,6*                 | -0,5*                      | -2,0*                | -0,3*                | -1,6*                | 0,2                  | 0,4                  |
|              | DP     | 0,2                   | 0,2                        | 0,9                  | 0,2                  | 0,5                  |                      |                      |
|              | CV (%) | 13,0                  | 37,9                       | 46,5                 | 54,5                 | 29,7                 |                      |                      |
| N-Alag (n=5) | Média  | -1,4**                | -0,2*                      | -2,1**               | -0,3*                | -2,3**               | -1,0                 | -0,2                 |
|              | DP     | 0,1                   | 0,1                        | 0,6                  | 0,1                  | 0,4                  |                      |                      |
|              | CV (%) | 10,2                  | 52,8                       | 29,1                 | 34,4                 | 17,1                 |                      |                      |

n é o número de indivíduos, DP é o desvio padrão e, CV, o coeficiente de variação; Símbolos (\*) com a mesma cor destacam os valores estatisticamente diferentes entre si, pelo teste de Kruskal Wallis (KW) a 5% de significância.

Fonte: Produção do autor.

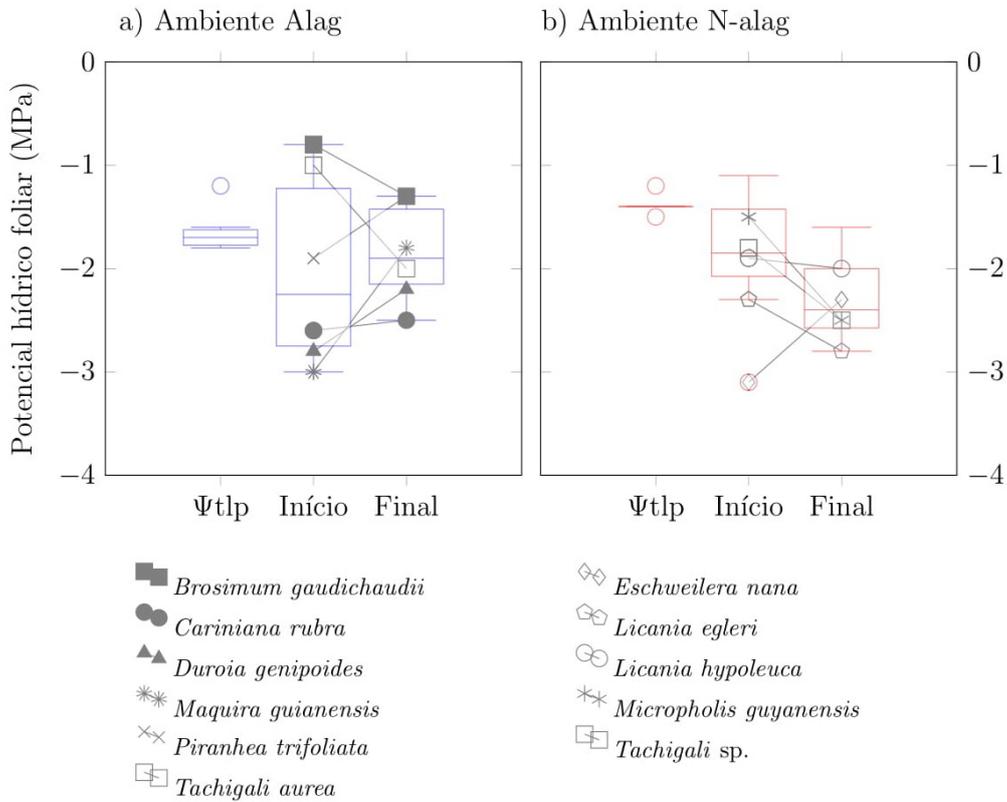
Em relação ao potencial hídrico, os valores máximos (KW=5,75; p=0,12) e mínimos (KW=4,28; p=0,23) não variaram entre os ambientes e períodos estudados. Ou seja, as árvores do ambiente Alag apresentaram a mesma variação no potencial hídrico, máximo e mínimo, durante o dia e sazonalmente.

Os potenciais hídricos foliares foram maiores ( $\Psi_{\text{foliar máx}}$ ) no início da manhã, às 7h e menores ( $\Psi_{\text{foliar mín}}$ ) entre 12 e 14h no ambiente Alag, tanto no início do período seco (KW=8,30; p<0,5), quanto no final (KW=8,31; p<0,5). O mesmo padrão foi observado no ambiente N-alag no início (KW=6,81; p<0,5) e no final do período seco (KW=6,82; p<0,5).

Os  $\Psi_{\text{foliar máx}}$  foram estatisticamente semelhantes sazonalmente, ou seja, início e final do período seco, nos ambientes Alag (KW=2,83; p=0,09) e N-alag (KW=0,69; p=0,40). Da mesma forma, os  $\Psi_{\text{foliar mín}}$  foram semelhantes nos ambientes estudados (Alag: KW=0,64 e p=0,42; N-alag, KW=0,88 e p=0,35).

A Figura 3.4 discrimina a variação do  $\Psi_{\text{tlp}}$  e  $\Psi_{\text{foliar mín}}$  por indivíduo no início e final do período seco, como apresentados na Tabela 3.6. As árvores do ambiente Alag não apresentaram variação estatisticamente significativa entre o  $\Psi_{\text{tlp}}$  e  $\Psi_{\text{foliar mín}}$  nos dois períodos avaliados (KW=1,09; p=0,58). Nesse grupo, nota-se que quatro indivíduos (*Cariniana rubra*, *Duroia genipodes*, *Maquira guianensis* e *Piranhea trifoliata*) apresentaram ligeiro aumento (tendência) ou potencial semelhante no final do período seco, comparado com o início desse, enquanto dois indivíduos apresentaram ligeira redução no potencial foliar (*Brosimum gaudichaudii* e *Tachigali aurea*). Consequentemente, a amplitude sazonal dos  $\Psi_{\text{foliar mín}}$ 's foi -0,4 MPa.

Figura 3.4 - Potencial hídrico foliar mínimo ( $\Psi_{\text{foliar}} \text{ mín}$ ) das árvores avaliadas no início e final do período seco do ano hidrológico 2015/16



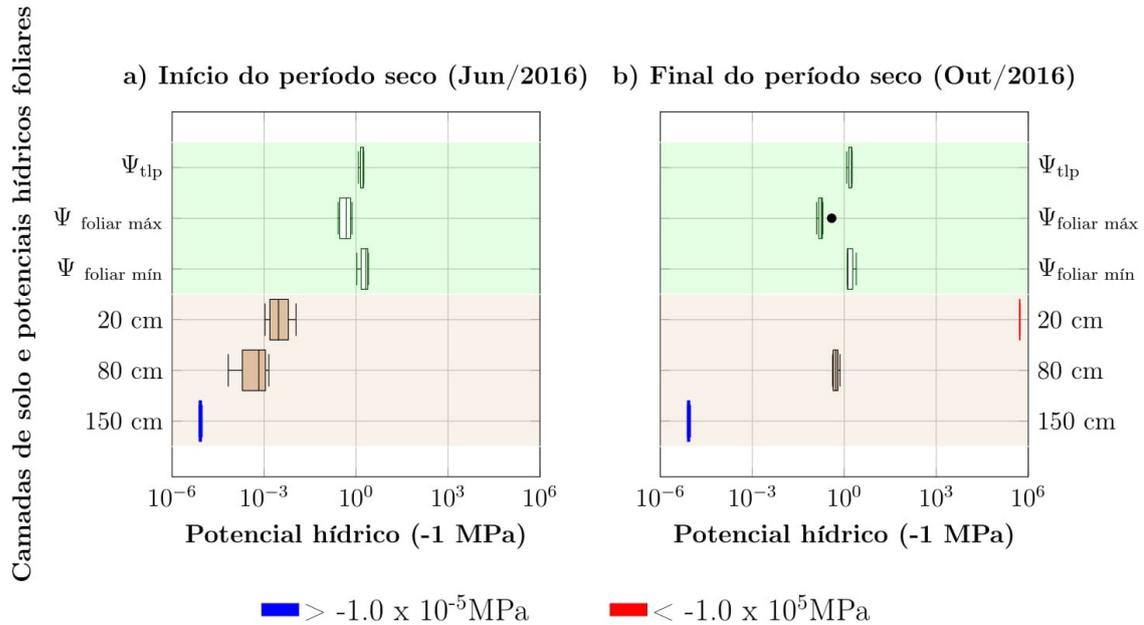
(a) Ambiente sazonalmente alagável (Alag) e (b) Ambiente não alagável (N-alag).  
Fonte: Produção do autor.

Os valores de  $\Psi_{\text{tlp}}$  e  $\Psi_{\text{foliar}} \text{ mín}$  variaram no ambiente N-alag nos dois períodos avaliados (início: KW=5,78 e  $p < 0,05$ ; final da seca: KW=6,82 e  $p < 0,50$ ). Nesse ambiente, um indivíduo apresentou tendência de aumento do potencial hídrico (*Eschweilera nana*), enquanto os demais exibiram redução (ou tendência) no potencial (*Licania egleri*, *Licania hypoleuca*, *Micropholis guyanensis* e *Tachigali sp.*), como mostra a Figura 3.4. A amplitude sazonal do  $\Psi_{\text{foliar}} \text{ mín}$  médio no ambiente N-alag foi de -0,2 MPa (Tabela 3.6).

### 3.3.4 Ambiente sazonalmente alagável: potencial hídrico no solo e nas plantas

A Figura 3.5 apresenta os valores médios de potenciais hídricos diários no solo nas profundidades 20 cm, 80 cm e 150 cm, o  $\Psi_{\text{tlp}}$ , o  $\Psi_{\text{foliar}} \text{ mín}$  e  $\Psi_{\text{foliar}} \text{ máx}$  das árvores localizadas no ambiente Alag no início e final do período seco sazonal.

Figura 3.5 - Valores médio de ponto de perda de turgor ( $\Psi_{tlp}$ ), potenciais hídricos foliares mínimo e máximo ( $\Psi_{foliar\ mín}$  e  $\Psi_{foliar\ máx}$ , respectivamente) das árvores avaliadas na parcela sazonalmente alagável (parcela Alag), e potenciais hídricos no solo nas profundidades 20 cm, 80 cm e 150 cm. a) Início e; b) Final do período seco sazonal.



Fonte: Produção do autor.

Os potenciais hídricos no solo nas camadas monitoradas estavam acima dos potenciais foliares ( $\Psi_{tlp}$ ,  $\Psi_{foliar\ mín}$ , e  $\Psi_{foliar\ máx}$ ) no início do período seco sazonal (Figura 3.5a). Em contraste no final do período, o solo atingiu potenciais muito negativos a 20 cm de profundidade (acima de  $-1,1 \cdot 10^7$  MPa ou  $-1,1 \cdot 10^{10}$  kPa). A 80 cm de profundidade os potenciais estavam acima dos valores de  $\Psi_{tlp}$ , e  $\Psi_{foliar\ mín}$ , mas abaixo de  $\Psi_{foliar\ máx}$ , enquanto o solo a 150 cm de profundidade estava saturado. Tomando como referência os limites hidráulicos das plantas, podemos assumir a existência de água disponível para as árvores nos dois primeiros metros do solo no início do período seco. No final desse período, as árvores provavelmente evitariam a água armazenada no primeiro metro (até 80 cm), devido os baixos potenciais, e poderiam acessar a água disponível no segundo metro de profundidade do solo (entre as camadas 80 e 150 cm).

### 3.4 Discussões

#### 3.4.1 Características dos solos e capacidade de armazenamento e retenção de água

Os solos do sítio JAV são ácidos, com elevada concentração de alumínio trocável, e baixa concentração de nutrientes e matéria orgânica. Também foram considerados rasos, predominantemente arenosos, mas com um aporte de argila com profundidades variável ao longo do perfil do solo.

Os solos avaliados foram classificados a nível de subordem como gleissolos háplicos (TOCANTINS, 2012). Trata-se de um solo fortemente influenciado pelo lençol freático e regime de umidade redutor, virtualmente livre de oxigênio dissolvido em razão da saturação por água durante todo o ano, ou pelo menos por um longo período (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2013). Esses tipos de solos também são encontrados nas áreas de várzea da Amazônia submetidas ao pulso de inundação.

Os gleissolos da várzea da Amazônia central (GUIMARAES et al., 2013) bem como os gleissolos da Amazônia noroeste (QUESADA et al., 2010) guardam estreita relação com seu material de origem, proveniente das regiões andinas e subandinas, o que confere elevado teor de nutrientes e, difere significativamente dos gleissolos do Sítio JAV e região (MARTINS et al., 2006).

O sítio está inserido em uma planície aluvial, um complexo mosaico de unidades geomorfológicas e sedimentares quaternárias (LATRUBESSE, 2008), por isso os solos nessa região foram desenvolvidos sobre sedimentos depositados pelas águas dos rios, sendo cerca de 92% constituído por areia (AQUINO et al., 2008). Como os solos são predominantemente arenosos, ao fim do período chuvoso, a água do alagamento é rapidamente drenada (BORMA et al., 2009).

No perfil avaliado, o solo apresentou alta capacidade de armazenamento e retenção de água e, baixa disponibilidade de água para as plantas. A capacidade de armazenamento de água é influenciada pelo percentual de macro e microporos e distribuição desses por tamanho nos solos. Os macroporos promovem rápida drenagem interna do solo, e nos microporos, a água é retida com energia muito alta (OLIVEIRA et al., 2004). Os solos apresentam baixa porosidade drenável (macroporosidade;  $> 145 \mu\text{m}$ ) e elevado volume de poros, com diâmetro extremamente pequeno (microporosidade;  $< 2,9 \mu\text{m}$ ), até 150 cm de profundidade. A partir do 200 cm, o solo é arenoso,

apresentando alta porosidade drenável.

Em relação a capacidade de armazenamento e retenção de água, os teores de umidade do solo correspondentes à saturação ( $\theta_s$ ) e ao conteúdo residual ( $\theta_r$ ) estiveram dentro da variação observada nos solos argilosos da Amazônia Central. Borma (2019) encontraram valores de  $\theta_r$  variando de 0,48 a 0,59  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  e  $\theta_r$  entre 0,29 e 0,46  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  para um solo na região próxima a Manaus. Tomasella e Hodnett (1996) encontraram valores de  $\theta_s$  variando de 0,45 a 0,59  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  e valores de  $\theta_r$  variando de 0,28 a 0,44  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  para camadas acima de 2 m de profundidade em uma região da Amazônia central. Segundo os referidos autores, esses valores são muito acima dos valores reportados na literatura para solos argilosos ( $\theta_s = 0,38$  e  $\theta_r = 0,11$ ) para a classe argilosa, de acordo com van Genuchten et al. (1991).

Estes resultados indicam que as camadas mais argilosas deste solo apresentam elevada porosidade (elevados valores de  $\theta_s$ ) e capacidade de retenção de umidade a elevadas tensões ( $\theta_r$ ), ligeiramente menores que os solos da região central da Amazônia. No entanto, ainda são solos argilosos diferentes daqueles reportados na literatura para regiões não tropicais (VAN GENUCHTEN et al., 1991). Tomasella e Hodnett (1996) obtiveram valores de ( $\theta_s - \theta_r$ ) entre 0,27  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  em 75 cm de profundidade a 0,11  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  em 135 cm de profundidade e reportam que esses valores estão bem abaixo daqueles calculados para todos os 12 grupos texturais dados por van Genuchten et al. (1991), onde o menor valor foi de 0,28  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ . Neste trabalho foram obtidos valores de ( $\theta_s - \theta_r$ ) variando de 0,17  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  na camada superficial (20 cm de profundidade) a 0,21  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  na camada a 40 cm de profundidade. Esses valores estão abaixo dos valores encontrados para Amazônia central e também abaixo dos valores reportados na literatura para solos argilosos (VAN GENUCHTEN et al., 1991), indicando a baixa disponibilidade de água deste solo para as plantas.

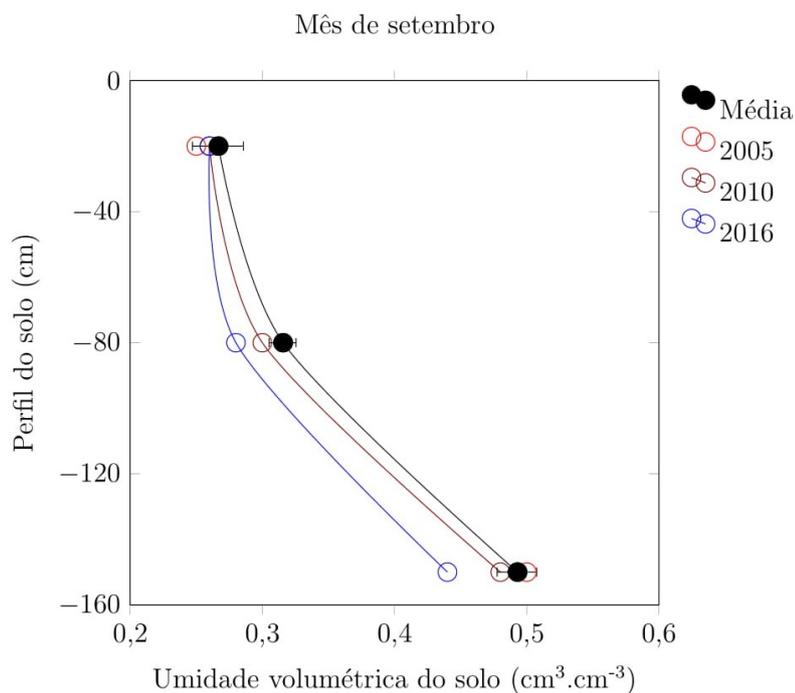
### 3.4.2 Disponibilidade de água nos solos durante a seca sazonal e extrema

No ano de ENSO as precipitações foram reduzidas na maior parte da região Amazônica (YANG et al., 2018) incluindo a parte leste (sítio JAV) (FONSECA et al., 2019). Essas reduções contribuíram para diminuir o período de alagamento no sítio JAV, acelerar a perda de água no solo após esse período e, antecipar e prolongar os meses secos (precipitação  $\downarrow 50$  mm) na região (FONSECA et al., 2019).

No início do período seco de 2015/16, os potenciais de água no solo no sítio JAV eram disponíveis para as plantas ( $\downarrow$ PMP). No final desse período, existia água no solo com potenciais acessíveis apenas no segundo metro de profundidade do solo.

Em setembro de 2016 observou-se um aumento na perda de água nas camadas a 80 e 150 cm de profundidade, cerca de 7% e 8 % , respectivamente, acima dos percentual registrados em 2010, considerado o ano mais seco desde 2004 em termos de umidade do solo (Figura 3.6).

Figura 3.6 - Umidades diárias médias em três profundidades do solo (20 cm, 80 cm, e 150 cm) registradas nos três primeiros anos do mês de setembro (2005, 2010 e 2016) que apresentaram os menores valores desde 2005, e comparadas com a média a longo prazo (calculada para o período de outubro/2004 a setembro/2015), sítio JAV.



Fonte: Adaptado de Costa (2015).

Trabalhos anteriores realizados no sítio JAV já demonstraram que no início do período seco (anos não-anômalos), a água do alagamento é rapidamente drenada, e perdida logo nos dois primeiros meses de seca no primeiro metro do solo (BORMA et al., 2009; COSTA, 2015). O potencial de água no solo nesses anos excedeu a capacidade de tolerância das plantas nas camadas avaliadas, entre junho a setembro (3 meses). E no ano de ENSO, quando o número de dias secos foram prolongados, essa limitação provavelmente foi ampliada para 4 meses (junho a setembro). Por isso, as árvores dependentes da umidade disponível nas camadas superficiais, provavelmente foram

expostas a condições de estresse hídrico na estiagem.

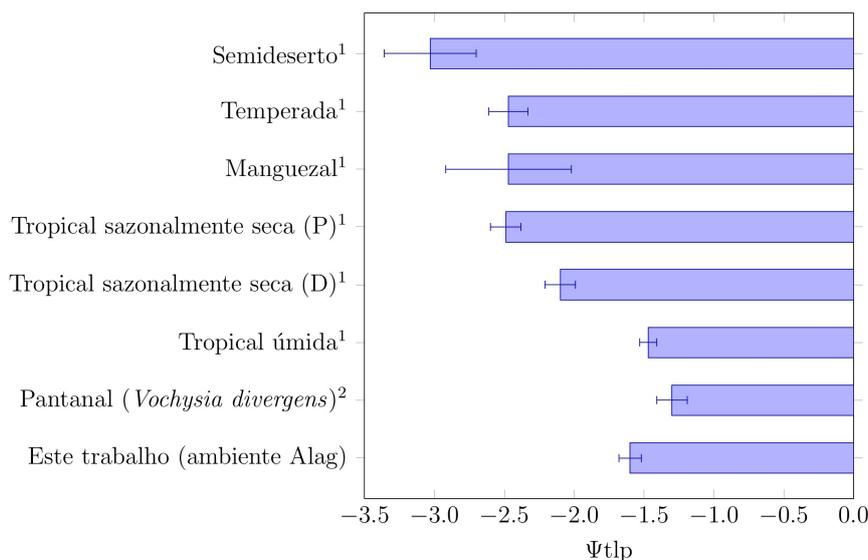
Com base nestes resultados e nos potenciais hídricos no perfil do solo, pode-se afirmar que a falta de água nas camadas superiores do solo pode ter atuado como um dos fatores limitantes para o funcionamento das árvores da planície do rio Araguaia nos períodos secos sazonais e na seca prolongada de 2015/16.

### 3.4.3 Resistência a seca e estratégias para lidar com a estiagem

O ponto de perda de turgor ( $\Psi_{tlp}$ ) é classicamente reconhecido como um dos principais determinantes fisiológicos do estresse hídrico da planta (BARTLETT et al., 2012), com impactos na integridade estrutural celular, no metabolismo e no desempenho de toda a planta (KRAMER; BOYER, 1995; MCDOWELL, 2011).

Neste trabalho foi observado que o ponto de perda de turgor foi mais negativo entre as árvores sujeitas ao alagamento (1,6 MPa), quando comparado com as árvores no ambiente que não alaga (1,4 MPa). Contudo, os valores de  $\Psi_{tlp}$  no sítio JAV estiveram dentro da faixa de variação das árvores situadas em ambientes reconhecidos pela baixa resistência a seca (BARTLETT et al., 2012), como as florestas tropicais úmidas (*terra firme*) e, acima (menos negativos) dos  $\Psi_{tlp}$ 's observados nas áreas de manguezais e florestas sazonalmente alagáveis da amazônia (Figura 3.7).

Figura 3.7 - Medidas de pontos de perda de turgor em diferentes ambientes.



Fonte: Adaptado de Bartlett et al. (2012)<sup>1</sup> e Dalmolin et al. (2012)<sup>2</sup>

Um  $\Psi_{tlp}$  mais negativo amplia a faixa de potencial hídrico no qual a folha permanece túrgida e mantém o funcionamento (SACK, 2004). Plantas com  $\Psi_{tlp}$  mais negativo tendem a manter condutância estomática, condutividade hidráulica, troca gasosa fotossintética e crescimento em menor potencial hídrico do solo, que é especialmente importante quando ocorrem secas durante a estação de crescimento (BLACKMAN et al., 2010; SACK et al., 2003). O  $\Psi_{tlp}$  é, portanto, uma característica que quantifica a capacidade de tolerar a seca, ao invés de evitar a seca por meio do fechamento dos estômatos (redução das trocas gasosas), perdas de folhas, e sobrevivendo da água armazenada (CHAVES et al., 2002).

Nas várzeas, as estratégias mais encontradas para lidar com o estresse hídrico são aquelas utilizadas para evitar a seca (PAROLIN et al., 2010), como por exemplo, a alocação alta para a biomassa radicular em relação às hastes, a regulação do balanço hídrico durante os períodos de seca, através da redução da condutância estomática, fechamento rápido dos estômatos (controle estomático) e perda de folhas (CHAVES et al., 2003; PAROLIN et al., 2010), e para manter elevado o potencial hídrico na planta (KOZLOWSKI; PALLARDY, 2002).

O potencial hídrico foliar, indicador do balanço hídrico das plantas (FERNANDES-CORREA; FURCH, 1992), varia entre -0,76 e -1,5 MPa nas planícies amazônicas durante o ano (PIECADE et al., 2013). Os potenciais de água das folhas nos meses mais secos tendem a ser continuamente baixos ao longo dos anos, semelhante ao de algumas espécies decíduas (por exemplo, *Crataeva benthamii*, *Tabebuia barbata*) no início da inundação em abril. *Laetia corymbulosa*, uma espécie arbórea considerada vulnerável à seca, tem os valores mais negativos durante os meses secos (-1,24 para -2,70 MPa em outubro/novembro), em comparação com o restante do ano (0,18 para -0,33 MPa) (PAROLIN et al., 2010).

Diferente das áreas de várzeas, neste trabalho não foi identificada variação sazonal no potencial hídrico mínimo (início e final do período seco) nos dois ambientes estudados no sítio JAV, sendo um indicativo de estratégia de evitação da seca por meio do controle estomático (comportamento isohídrico).

No Cerrado, geralmente, o potencial hídrico foliar mínimo das árvores tende a ser semelhante (-1,4 a -1,8 MPa) nos períodos seco e chuvoso (MEINZER et al., 1999; NAVES-BARBIERO et al., 2000; PALHARES et al., 2010). Essas espécies apresentam controle estomático sobre a transpiração durante o período seco e se caracterizam por um comportamento isoídrico (PALHARES et al., 2010).

Os mecanismos para o comportamento isohídrico de algumas árvores do cerrado são: redução da área foliar total e/ou a redução na condutância estomática foliar, bem como a otimização da água armazenada no tronco (BUCCI et al., 2004; BUCCI et al., 2005; BUCCI et al., 2008) para evitar a completa dessecação foliar e manter a assimilação de carbono (KANEGAE et al., 2000; SASSAKI et al., 1997). Importante também considerar a contribuição da profundidade do sistema radicular e que, em muitos casos, penetra nas camadas mais profundas do solo, assegurando uma fonte de água estável para as plantas na estiagem (STERNBERG et al., 2004), como também, a capacidade fisiológica das raízes em captar água com potenciais hídricos mais baixos (PALHARES et al., 2010).

Em condições de seca extrema, existe uma “armadilha isohídrica” quando espécies de plantas vasculares com um comportamento isohídrico restrito são submetidas a seca prolongada. Espécies isohídricas fecham seus estômatos em potenciais relativamente altos do solo e plantas e, portanto, não são capazes de manter a transpiração adequada e a absorção de nutrientes durante longos períodos de seca (SALAZAR-TORTOSA et al., 2018). Segundo os mesmos autores, espécies relativamente tolerantes à seca com um comportamento mais aniso-hídrica (e.g., *Pinus halepensis*) podem manter os estômatos abertos e a transpiração com menores potenciais hídricos, escapando dessa retroalimentação prejudicial.

Considerando o reduzido número de indivíduos amostrados, não pode-se afirmar se de fato esta floresta é constituída por espécies predominantemente vulneráveis à seca e com comportamento isohídricas que neste caso, estariam sujeitas a “armadilha isohídrica”. No entanto, importante destacar que os resultados do presente estudo corroboram com os trabalhos de Kurzatkowski et al. (2015) e Homeier et al. (2017), quando afirmam que as árvores da planície do rio Araguaia são menos resistentes ao estresse hídrico, comparado com as áreas de várzea amazônica, porque a intensidade do alagamento é menor (JUNK et al., 2013), e possivelmente, os filtros ambientais selecionaram espécies menos resistentes ao estresse.

Também não pode-se descartar que esse cerrado sazonalmente alagável possa ser constituído, por indivíduos que apresentam maior controle estomático, e podem utilizar de estratégias de evitação à seca, como observado nas áreas não alagáveis desse bioma.

### 3.5 Conclusão

A disponibilidade de água no solo nas camadas superficiais provavelmente não atendeu as necessidades das árvores em alguns meses do período seco sazonal e da seca prolongada do ano de ENSO, porque os potenciais hídricos estavam abaixo (muito negativos) do limite de operação dos indivíduos avaliados.

A resistência à seca, representada pelos valores de ponto de perda de turgor, dos indivíduos localizados no ambiente sazonalmente alagável foi maior quando comparado com os indivíduos de ambientes que não alagam. No entanto, os valores apresentados pode ser considerados maiores (menos negativos) quando comparada ambientes sujeitos a condições hídricas limitantes, como as áreas de mangue e as florestas tropicais sazonalmente secas.

## 4 CONCLUSÕES

O padrão de crescimento das árvores da floresta sazonalmente alagável da planície do rio Araguaia foi diferente de outros ambientes inundados nas regiões tropicais durante os anos secos. O padrão de crescimento foi caracterizado por dormência do tronco no período alagado e redução do incremento no período seco.

No período alagado, a confirmação da dormência do tronco era um padrão esperado, porém destaca-se que a duração desse efeito foi bem maior comparado com as áreas onde os efeitos do pulso de inundação pode ser mais limitante, como nas várzeas amazônicas.

No caso do período seco, a disponibilidade de água no solo nas camadas superficiais provavelmente não atendeu as necessidades das árvores em alguns meses do período seco sazonal e da seca prolongada do ano de ENSO, e provavelmente, afetou no padrão de crescimento das árvores.

Parte do padrão e taxa de incremento anual do tronco, níveis de resistência a seca, como também, da ausência de alterações nessas variáveis entre os ambientes topográficos mais altos (não submersos) e baixos (sazonalmente submerso) foram explicadas pelas condições hidroclimáticas e edáficas da floresta.

Importante destacar que embora esta floresta seja anualmente submetida a secas prolongadas sazonais, a princípio o nível de resistência a seca foi considerado baixo, e uma das estratégias para lidar com a seca foi de evitação a dessecação, por meio do maior controle estomático.

Como as respostas das árvores diferem entre as florestas sazonalmente alagáveis, torna-se difícil generalizar e estabelecer cenários mais conclusivos sobre os impactos das secas extremas no crescimento das árvores. Considerando as previsões de aumento das frequências e severidade das secas na região Amazônica, investigações sobre as respostas das árvores aos efeitos das seca não devem ser negligenciados.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AALTO, R. et al. Episodic sediment accumulation on Amazonian flood plains influenced by El Niño/Southern Oscillation. **Nature**, v. 425, n. 6957, p. 493–497, 2003. 26
- ABDU-HAMID, H.; MENCUCCINI, M. Age-and size-related changes in physiological characteristics and chemical composition of acer pseudoplatanus and fraxinus excelsior trees. **Tree Physiology**, v. 29, n. 1, p. 27–38, 2009. 71
- ABREU, E. M. A.; FERNANDES, A. R.; RUIVO, M. L. P. Fertilidade do solo e nutrição de plantas químicas de um gleissolo do rio Guamá. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 3, p. 277–285, 2007. 15
- ADIS, J.; LATIF, M. Amazonian arthropods respond to El Niño. **Biotropica**, v. 28, n. 3, p. 403–407, 1996. 40
- AL-ASADI, R. A.; MOUAZEN, A. M. Combining frequency domain reflectometry and visible and near infrared spectroscopy for assessment of soil bulk density. **Soil and Tillage Research**, v. 135, p. 60–70, 2014. 10
- AQUINO, A. M. **Efeito do alagamento, das características físicas, químicas e hidráulicas do solo solo sobre o incremento diamétrico da Vochysia divergens Pohl no Pantanal matogrossense**. Tese (Doutorado em Física Ambiental) — Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Cuiabá, 2016. 70
- AQUINO, S.; LATRUBESSE, E. M.; SOUZA-FILHO, E. E. de. Relações entre o regime hidrológico e os ecossistemas aquáticos da planície aluvial do rio Araguaia. **Acta Scientiarum - Biological Sciences**, v. 30, n. 4, p. 361–369, 2008. 25, 30, 41, 42, 77, 96
- BARROS, F. D. V. **Hydraulic functioning and drought vulnerability of two tropical forests**. 139 p. Tese (Doutorado em Ecologia) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017. 2, 19, 20
- BARTLETT, M. K.; SCOFFONI, C.; SACK, L. The determinants of leaf turgor loss point and prediction of drought tolerance of species and biomes: a global meta-analysis. **Ecology Letters**, v. 15, n. 5, p. 393–405, 2012. 20, 21, 22, 99
- BENNETT, A. C. et al. Larger trees suffer most during drought in forests worldwide. **Nature Plants**, v. 1, n. 15139, p. 1–5, 2015. 71

BI, J. et al. Sunlight mediated seasonality in canopy structure and photosynthetic activity of Amazonian rainforests. **Environmental Research Letters**, v. 10, p. 1–6, 2015. [1](#)

BLACK, B. A.; COLBERT, J. J.; PEDERSON, N. Relationships between radial growth rates and lifespan within north american tree species. **Ecoscience**, v. 15, n. 3, p. 349–357, 2008. [71](#)

BLACKMAN, C. J.; BRODRIBB, T. J.; JORDAN, G. J. Leaf hydraulic vulnerability is related to conduit dimensions and drought resistance across a diverse range of woody angiosperms. **New Phytologist**, v. 188, p. 1113–1123, 2010. [22](#), [100](#)

BLOOM, A. A. et al. Seasonal variability of tropical wetland CH<sub>4</sub> emissions: the role of the methanogen-available carbon pool. **Biogeosciences**, v. 9, n. 8, p. 2821–2830, 2012. [39](#)

BORMA, L. S. Solos da Amazônia brasileira. **In press**, 2019. [97](#)

BORMA, L. S. et al. Atmosphere and hydrological controls of the evapotranspiration over a floodplain forest in the Bananal Island region, Amazonia. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 114, n. 1, p. 1–12, 2009. [2](#), [3](#), [28](#), [30](#), [33](#), [35](#), [41](#), [42](#), [47](#), [70](#), [76](#), [77](#), [78](#), [96](#), [98](#)

BORMA, L. S.; NOBRE, C. A. (Ed.). **Secas na Amazônia: causas e consequências**. São Paulo: Oficina de Texto, 2013. 367 p. [26](#)

BRODRIBB, T.; HOLBROOK, N. Functional relationships between leaf hydraulics and leaf economic traits in response to nutrient addition in subtropical tree species. **Plant Physiology**, v. 132, p. 2166—2173, 2003. [20](#)

BRUM JUNIOR, M. M. **Partição de recursos hídricos em comunidades vegetais de campo rupestres e campo de altitude no sudeste brasileiro**. Tese (Doutorado em Ecologia) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013. [2](#), [20](#)

BRUNO, R. D. et al. Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. **Hydrological Processes**, v. 20, p. 2477–2489, 2006. [2](#), [13](#)

BUCCI, S. J. et al. Mechanisms contributing to seasonal homeostasis of minimum leaf water potential and predawn disequilibrium between soil and plant water potential in neotropical savanna trees. **Tree**, v. 19, p. 296–304, 2005. [101](#)

\_\_\_\_\_. Processes preventing nocturnal equilibration between leaf and soil water potential in tropical savanna woody species. **Tree Physiology**, v. 24, p. 1119–1127, 2004. 101

\_\_\_\_\_. Water relations and hydraulic architecture in cerrado trees: adjustments to seasonal changes in water availability and evaporative demand. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 20, p. 233–245, 2008. 101

CANDIDO, E. S. et al. Determinação de curvas características utilizando uma pequena centrífuga e o método do papel filtro. In: **XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Goiânia: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2014. p. 1–7. 12

CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought – from genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**, v. 30, p. 239–264, 2003. 76, 100

CHAVES, M. M. et al. How plants cope with water stress in the field: photosynthesis and growth. **Annals of Botany**, v. 89, p. 907–916, 2002. 100

CHRISTOFFERSEN, B. O. et al. Mechanisms of water supply and vegetation demand govern the seasonality and magnitude of evapotranspiration in Amazonia and Cerrado. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 191, n. February, p. 33–50, 2014. 2

CONNOR, D. J.; LEGGE, N. J.; TURFER, N. C. Water relations of mountain ash (*Eucalyptus regnans* F. Muell.) forests. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 4, p. 753–762, 1977. 20

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE. **ERA5**: fifth generation of ecmwf atmospheric reanalyses of the global climate. 2019. Disponível em: <<https://cds.climate.copernicus.eu>>. Acesso em: 11 nov. 2019. 45

COSTA, G. B. **Fluxos de energia, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> sobre a floresta em planície de inundação da Ilha do Bananal**. Tese (Doutorado em Ecologia de Aplicada) — Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2015. 2, 3, 28, 30, 31, 32, 41, 42, 70, 76, 77, 98

COSTANZA, R. et al. The value of the world’s ecosystem services and natural capital. **Nature**, v. 387, p. 253–260, 1997. 1, 39

CUNHA, C. D.; JUNK, W. Year-to-year changes in water level drive the invasion of *Vochysia divergens* in pantanal grasslands. **Applied Vegetation Science**, v. 7, p. 103 – 110, 02 2009. 70

DALMAGRO, H. J. et al. Physiological responses to extreme hydrological events in the Pantanal wetland: heterogeneity of a plant community containing super-dominant species. **Journal of Vegetation Science**, v. 27, n. 3, p. 568–577, 2016. 70

\_\_\_\_\_. The physiological light response of two tree species across a hydrologic gradient in Brazilian savanna (Cerrado). **Photosynthetica**, v. 52, n. 1, p. 22–35, 2014. 70

D'ALMEIDA, C. et al. The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 633–647, 2007. 13

DALMOLIN, A. C. et al. Effects of flooding and shading on growth and gas exchange of *Vochysia divergens* Pohl (*Vochysiaceae*) of invasive species in the Brazilian Pantanal. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 24, n. 2, p. 75–84, 2012. 20, 99

DE SCHEPPER, V.; STEPPE, K. Development and verification of a water and sugar transport model using measured stem diameter variations. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 8, p. 2083–2099, 2010. 17

DE SIMONE, O. et al. Impacto da morfologia radicular no metabolismo e na distribuição de oxigênio em raízes e rizosfera de duas espécies de várzea da Amazônia Central. **Biologia Vegetal Funcional**, v. 29, n. 9, p. 1025–1035, 2002. 15

DE SIMONE, O.; JUNK, W. J.; SCHMIDT, W. Central amazon floodplain forests: root adaptations to prolonged flooding. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 50, n. 6, p. 848–855, 2003. 15, 24

DE SIMONE, O. et al. Adaptations of central amazon tree species to prolonged flooding: root morphology and leaf longevity. **Plant Biology**, v. 4, n. 4, p. 515–522, 2002. 15, 24

DECENTLAB-GMBH. **Point dendrometers**. 2018. Disponível em: <<https://natkon.ch/products/>>. 37, 51

DINGMAN, S. L. **Physical hydrology**. 2. ed. Upper Saddle River, N.J. : [s.n.], 2002. 646 p. 6, 13

DREW, D. M.; DOWNES, G. M. The use of precision dendrometers in research on daily stem size and wood property variation : a review the use of precision dendrometers in research on daily stem size and wood property variation. **Dendrochronologia**, v. 27, n. 2, p. 159–172, 2009. 18

DURÃES, F. O. M.; MAGALHÃES, P. C. Transporte de água no Sistema solo-planta-atmosfera: movimento de água e solutos na planta. In: ALBUQUERQUE, P. E. P. de; DURÃES, F. O. M. (Ed.). **Uso e manejo de irrigação**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. cap. Movimento, p. 169–223. 13, 14

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p. 79, 84

\_\_\_\_\_. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, EMBRAPA-CNPS, 2013. 353 p. 96

ENGELBRECHT, B. M. J.; COMITA, L. S.; CONDIT, R. Drought sensitivity shapes species distribution patterns in tropical forests. **Nature**, v. 447, p. 80–82, 2007. 75

FAHN, A. et al. Possible contributions of wood anatomy to the determination of the age of tropical trees. In: BORMANN, F.; BERLYN, G. (Ed.). **Age and growth rate of tropical trees: new directions for research**. New Haven: Yale University, 1981. 50

FERNANDES-CORREA, A. F.; FURCH, B. Investigations on the tolerance of several trees to submergence in blackwater (igapó) and whitewater (várzea) inundation forests near Manaus, central Amazonian. **Amazoniana**, v. 12, p. 71–84, 1992. 100

FERREIRA, C. S. et al. Genetic variability, divergence and speciation in trees of periodically flooded forests of the amazon: a case study of himatanthus sucuuba (spruce) woodson. In: JUNK, W. et al. (Ed.). **Amazonian floodplain forests: ecophysiology, biodiversity and sustainable management**. [S.l.]: Springer, 2010. v. 210, cap. 15. 24

- FERREIRA-FEDELE, L. et al. Periodicidade do crescimento de *Esenbeckia leiocarpa* Engl. (guarantã) em duas áreas da região sudeste do Estado de São Paulo. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 1, n. 65, p. 141–149, 03 2004. 69
- FERREIRA, W. A. et al. **Efeito da inundação sobre as propriedades de glei pouco hímico de várzea do rio Guamá, nos municípios de Belém e Santa Isabel, PA**. Belém: Embrapa-CPATU, 1998. 29 p. 15
- FLORA DO BRASIL 2020 EM CONSTRUÇÃO. **Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. 2018. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>>. 58
- FOLEY, J. A. et al. El Niño-Southern oscillation and the climate, ecosystems and rivers of Amazonia. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 16, n. 4, 2002. 26, 40
- FONSECA, L. D. M. et al. Phenology and seasonal ecosystem productivity in an Amazonian floodplain forest. **Remote Sensing**, v. 11, n. 1530, 2019. 3, 29, 41, 43, 45, 70, 71, 76, 97
- GIGLIO, J. N.; KOBAYAMA, M. Interceptação da chuva: uma revisão com ênfase no monitoramento em florestas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 2, p. 297–317, 2013. 13
- GLOOR, M. et al. Recent amazon climate as background for possible ongoing and future changes of amazon humid forests. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 29, n. 9, p. 1384–1399, 2015. 39
- GROGAN, J.; SCHULZE, M. The impact of annual and seasonal rainfall patterns on growth and phenology of emergent tree species in southeastern Amazonia, Brasil. **Biotropica**, v. 44, n. 3, p. 331–340, 2012. 19, 69
- GUIMARAES, S. T. et al. Caracterização e classificação de gleissolos da várzea do rio solimões (Manacapuru e Iraduba), Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 317–326, 2013. 96
- GUTSCHICK, V. P.; BASSIRIRAD, H. Extreme events as shaping physiology, ecology, and evolution of plants: toward a unified definition and evaluation of their consequences. **New Phytologist**, v. 160, p. 21–42, 2003. 75
- HAASE, K.; RÄTSCHE, G. The morphology and anatomy of tree roots and their aeration strategies. In: JUNK, W. et al. (Ed.). **Amazonian floodplain forests: ecophysiology, biodiversity and sustainable management**. London: Springer, 2010. v. 210, p. 141–162. 24

HERRERA, A. Responses to flooding of plant water relations and leaf gas exchange in tropical tolerant trees of a black-water wetland. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, n. May, p. 1–12, 2013. 15, 16

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. Cambridge: Academic Press, 1998. 771 p. 7, 8

HINCKLEY, T.; BRUCKERHOFF, D. N. The effect of drought on water relations and stem shrinkage in quercus alba. **Canadian Journal of Botany**, v. 53, n. January, p. 62–72, 1975. 17

HOMEIER, J.; KURZATKOWSKI, D.; LEUSCHNER, C. Stand dynamics of the drought-affected floodplain forests of Araguaia River, Brazilian Amazon. **Forest Ecosystems**, v. 4, n. 1, 2017. 2, 3, 26, 70, 101

HORTON, R. E. The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. **Eos, Transactions, American Geophysical Union**, v. 14, n. 1, p. 446–460, 1933. 7

HUETE, A. R. et al. Amazon green-up with sunlight in dry season Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical Research Letters**, v. 33, p. 1–4, 2006. 1

HUFFMAN, G. et al. **Integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG), version 4.4**. 2017. Disponível em: <<ftp://arthurhou.pps.eosdis.nasa.gov/gpmdata/>>. Acesso em: 20 dez. 2017. 43, 44, 78

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estações Automáticas**. 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 25 out. 2017. 43

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE-IPCC. **Climate change 2014**: synthesis report. contribution of working groups i, ii and iii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva, Switzerland, 2014. 151 p. 1

IRION, G. et al. Development of the amazon valley during the middle to late quaternary: Sedimentological and climatological observations. In: JUNK, W. et al. (Ed.). **Amazonian floodplain forests**: ecophysiology, biodiversity and sustainable management. London: Springer, 2010. v. 210, cap. 2, p. 27–42. 24

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. et al. Record-breaking warming and extreme drought in the amazon rainforest during the course of El Niño 2015-2016. **Scientific Reports**, v. 6, n. May, p. 1–7, 2016. 3, 26, 27, 39, 43, 55, 79

JUNK, W. J. Wetlands of tropical South America. In: WHIGHAM, D.; DYKYJOVÁ, D.; HEJNÝ, S. (Ed.). **Wetlands of the world: inventory, ecology and management**. Dordrecht: Springer, 1993. p. 679–739. 32, 77

\_\_\_\_\_. **The central Amazon floodplain: ecology of a pulsating system**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 1997. 525 p. 23

JUNK, W. J.; BAYLEY, P. B.; SPARKS, R. E. The flood pulse concept in river-floodplain systems. **Canadian Special Publications for Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 106, p. 110–127, 1989. 2, 23

JUNK, W. J. et al. Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 24, n. 1, p. 5–22, 2013. 1, 23, 30, 39, 42, 70, 77, 101

\_\_\_\_\_. A classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands. **Wetlands**, v. 31, n. 4, p. 623–640, 2011. 1, 20

KANEGAE, M.; BRAZ, V.; FRANCO, A. C. Atmospheric and hydraulic limitations on transpiration in brazilian cerrado woody species. **Functional Ecology**, v. 23, n. 4, p. 457–466, 2000. 101

KING, G. et al. Climatic drivers of hourly to yearly tree radius variations along a 6°C natural warming gradient. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 168, p. 36–46, 2013. 18, 19

KOZLOWSKI, T. T. Responses of woody plants to flooding. In: KOZLOWSKI, T. T. (Ed.). **Flooding and plant growth**. Cambridge: Academic Press, 1984. cap. 4, p. 129–163. 14, 15

KOZLOWSKI, T. T.; PALLARDY, S. G. Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses. **The Botanical Review**, v. 68, p. 270–334, 2002. 100

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soils**. California: Academic Press, 1995. 99

- KURZATKOWSKI, D.; LEUSCHNER, C.; HOMEIER, J. Effects of flooding on trees in the semi-deciduous transition forests of the Araguaia floodplain, Brazil. **Acta Oecologica**, v. 69, p. 21–30, 2015. 2, 3, 26, 41, 70, 76, 101
- LAMBERS, H.; STUART CHAPIN III, F.; PONS, T. **Plant physiological ecology**. 2. ed. New York: Springer, 2008. 622 p. 16, 28
- LATRUBESSE, E. M. Patterns of anabranching channels: the ultimate end-member adjustment of mega rivers. **Geomorphology**, v. 101, n. 1-2, p. 130–145, 2008. 24, 96
- LATRUBESSE, E. M.; STEVAUX, J. C. Geomorphology and environmental aspects of the Araguaia fluvial basin, Brasil. **Zeitschrift fur Geomorphologie**, v. 129, p. 109–127, 2002. 25, 30, 42, 77
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livraria da Travessa, 2012. 352 p. 9
- LICHTENTHALER, H. K. The stress concept in plants: an introduction. In: CSERMELY, P. (Ed.). **Stress of life: from molecules to man**. [S.l.]: Annals of the New York Academy of Sciences, 1998. v. 851, p. 187–198. 76
- LISI, C. S. et al. Tree-ring formation, radial increment periodicity, and phenology of tree species from a seasonal semi-deciduous forest in southeast Brazil. **IAWA Journal**, v. 29, n. 2, p. 189–207, 2013. 19, 69
- LOBO, G. S.; WITTMANN, F.; PIEDADE, M. T. F. Response of black-water floodplain (igapó) forests to flood pulse regulation in a dammed Amazonian river. **Forest Ecology and Management**, v. 434, p. 110 – 118, 2019. 39
- LOPEZ, O. R.; KURSAR, T. A. Interannual variation in rainfall, drought stress and seedling mortality may mediate monodominance in tropical flooded forests. **Oecologia**, v. 154, p. 35–43, 2018. 75
- L'HEUREUX, M. et al. Observing and predicting the 2015/16 El Niño. **American meteorological society**, v. 98, n. 7, p. 1363–1382, 2017. 27
- MAIDMENT, D. R. **Handbook of hydrology**. Nova York: McGraw-Hill Education, 1993. 1424 p. 11
- MALHI, Y. et al. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change induced dieback of the Amazon rainforest. **PNAS**, v. 106, n. 49, p. 20610–20615, 2009. 39, 72

MARCUZZO, F. F. N.; GOULARTE, E. R. P. Caracterização do ano hidrológico e mapeamento espacial das chuvas nos períodos úmido e seco do Estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 1, p. 091–099, 2013. 3, 26, 30, 42, 76, 77

MARENGO, J. A. et al. Climate change in the Amazon basin: tipping points, changes in extremes, and impacts on natural and human systems. In: BUSH, M.; FLENLEY, J.; GOSLING, W. (Ed.). **Tropical rainforest responses to climatic change**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2011. cap. 9, p. 259–284. 2, 27

\_\_\_\_\_. The drought of Amazonia in 2005. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 363, n. 1498, p. 1773—1778, 2008a. 26, 27, 40, 75

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **Journal of Climate**, v. 21, n. 3, p. 495–516, 2008b. 26, 27, 40

MARTINS, A. K. E. et al. Relação solo-geoambiente em áreas de ocorrência de ipucas na planície do médio Araguaia – Estado do Tocantins. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 297–310, 2006. 96

MATTOS, P. P.; SEITZ, R. A.; SALIS, S. M. **Potencial dendroecológico de *Tabebuia heptaphylla* (Vell.) Toledo**. 2004. Disponível em: <<https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1598>>. Acesso em: 8 mar. 2019. 69

MCCAULEY, L. A. et al. Land use and wetland drainage affect water levels and dynamics of remaining wetlands. **Ecosphere**, v. 6, n. 6, p. 92, 2015. 39

MCDOWELL, N. G. Mechanisms linking drought, hydraulics, carbon metabolism, and vegetation mortality. **Plant Physiology**, v. 155, p. 1051–1059, 2011. 99

MEINZER, F. et al. Atmospheric and hydraulic limitations on transpiration in brazilian cerrado woody species. **Functional Ecology**, v. 13, n. 2, p. 273–282, 1999. 100

MELACK, J.; HESS, L. Remote sensing of the distribution and extent of wetlands in the Amazon Basin. In: JUNK, W. et al. (Ed.). **Amazonian floodplain forests: ecophysiology, biodiversity and sustainable management**. [S.l.]: Springer, 2010. v. 210, cap. 3, p. 43–60. 23, 24, 25

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis**. Washington: World Resources Institute, 2005. 1, 39

MITSCH, W. J.; GOSSELINK, J. G. **Wetlands**. 5. ed. New Jersey: [s.n.], 2015. 736 p. 1, 39

MOREIRA, K. S. et al. **Avaliação da dinâmica de liteira em ecótonos no entorno da Ilha do Bananal, município de Pium - Tocantins**. 2005. Disponível em: <[https://daac.ornl.gov/LBA/ibaconferencia/2005\\_lba\\_student\\_conf/abstracts/140\\_ab.html](https://daac.ornl.gov/LBA/ibaconferencia/2005_lba_student_conf/abstracts/140_ab.html)>. 3, 26

MOUAZEN, A. M.; AL-ASADI, R. A. Influence of soil moisture content on assessment of bulk density with combined frequency domain reflectometry and visible and near infrared spectroscopy under semi field conditions. **Soil and Tillage Research**, v. 176, p. 95–103, 2018. 10

NAVES-BARBIERO, C. C. et al. Fluxo de seiva e condutância estomática de duas espécies lenhosas sempre-verdes no campo sujo e cerrado. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 12, n. 2, p. 119–134, 2000. 100

NEGRON-JUAREZ, R. I. et al. Control of dry season evapotranspiration over the Amazonian forest as inferred from observations at a southern Amazon forest site. **Journal of Climate**, v. 20, n. 12, p. 2827–2839, 2007. 71

NEPSTAD, D. C. et al. The effects of partial throughfall exclusion on canopy processes, aboveground production, and biogeochemistry of an Amazon forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, p. 8085, 2002. 1, 13, 14

\_\_\_\_\_. Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest. **Ecology**, v. 88, n. 9, p. 2259–2269, 2007. 1, 2, 40, 71

NILSSON, C.; RENOFALT, B. M. Linking flow regime and water quality in rivers: a challenge to adaptive catchment management. **Ecology and Society**, v. 13, n. 2, p. 18, 2008. 39

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, v. 4, n. 10, p. 957–988, 1991. 13

OLIVEIRA, G. C. et al. Caracterização química e físico-hídrica de um latossolo vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 327–336, 2004. 96

OLIVEIRA, L. D. S. **Fluxos atmosféricos de superfície sobre uma área de ecótono na Ilha do Bananal**. 114 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006. 32, 33, 34

OLIVEIRA-WITTMANN, A. et al. Seed germination and seedling establishment of Amazonian floodplain trees. In: JUNK, W. J. et al. (Ed.). **Amazonian floodplain forests: ecophysiology, biodiversity and sustainable management**. [S.l.]: Springer, 2010. v. 210, cap. 13, p. 259–280. 28

PALHARES, D.; FRANCO, A. C.; ZAIDAN, L. B. P. Respostas fotossintéticas de plantas de cerrado nas estações seca e chuvosa. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 8, n. 2, p. 213–220, 2010. 100, 101

PALTINEANU, I. C.; STARR, J. L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. **Soil Science Society of America**, v. 61, p. 1576–1585, 1997. 10

PANGALA, S. R. et al. Large emissions from floodplain trees close the Amazon methane budget. **Nature**, p. 1–7, 2017. 39

PARENT, C. et al. An overview of plant responses to soil waterlogging. **Plant Stress**, v. 2, n. 1, p. 20–27, 2008. 15, 16, 40, 72

PAROLIN, P. Morphological and physiological adjustments to waterlogging and drought in seedlings of Amazonian floodplain trees. **Oecologia**, v. 128, n. 3, p. 326–335, 2001. 1

\_\_\_\_\_. Flood-tolerant trees of Amazonian floodplains. **Revista Pesquisas Botânica**, v. 61, p. 7–38, 2010. 1, 15, 16, 20, 27, 40

PAROLIN, P. et al. Review of tree phenology in central Amazonian floodplains. **Revista Pesquisas Botânica**, v. 52, p. 195–222, 2002. 25

PAROLIN, P.; ARMBRÜSTER, N.; JUNK, W. J. Two Amazonian floodplain trees react differently to periodical flooding. **Tropical Ecology**, v. 47, n. 2, p. 243–250, 2006. 20

PAROLIN, P. et al. Drought responses of flood-tolerant trees in Amazonian floodplains. **Annals of Botany**, v. 105, n. 1, p. 129–139, 2010. 20, 25, 40, 75, 100

\_\_\_\_\_. Amazonian várzea forests: adaptive strategies of trees as tools for forest management. **Advances**, v. 16, p. 180–184, 2004. 15, 24

PEREIRA, H. R.; REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T. Características da atmosfera na primavera austral durante o El Niño de 2015/2016. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 293–310, 2017. 27

PHILANDER, S. **El Niño, La Niña and the southern oscillation**. 1. ed. São Paulo: Academic press, 1989. 293 p. 27

PHILLIPS, O. L. et al. Drought sensitivity of the amazon rainforest. **Science**, v. 323, n. 5919, p. 1344–1347, 2009. 1, 40

PIEDADE, M. T. et al. Iniciando a viagem pelas áreas úmidas amazônicas: uma viagem pelas várzeas e igapó. In: LOPES, A.; PIEDEDE, M. T. F. (Ed.). **Conhecendo as áreas úmidas amazônicas: uma viagem pelas várzeas e igapós**. Manaus: INPA, 2015. cap. 1, p. 15–22. 1

PIEDADE, M. T. F. et al. Impactos da inundação e seca na vegetação das áreas alagáveis amazônicas. In: BORMA, L. D. S.; NOBRE, C. A. (Ed.). **Secas na Amazônia: causas e consequências**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. cap. 16, p. 268–304. 1, 2, 23, 24, 27, 28, 39, 40, 71, 75, 100

PINTO, C. d. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p. 8, 12

PRENTICE, I. C.; LLOYD, J. C-quest in the Amazon basin. **Nature**, v. 396, n. 6712, p. 619–620, 1998. 40

QUESADA, C. A. et al. Variations in chemical and physical properties of amazonforestsoils in relation to their genesis. **Biogeosciences**, v. 7, n. 5, p. 1515–1541, 2010. 96

QUIRING, S. M. Developing objective operational definitions for monitoring drought. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 48, p. 1217–1229, 2009. 75

RANDOW, C. von et al. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, n. 1-3, p. 5–26, 2004. 13

READ, J. et al. Sclerophylly in two contrasting tropical environments: low nutrients vs. low rainfall. **American Journal of Botany**, v. 93, p. 1601–1614, 2006. 22

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **O solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri: Manole, 2017. 524 p. 8, 9, 13

- RESENDE, A. F. et al. Massive tree mortality from flood pulse disturbances in amazonian floodplain forests: The collateral effects of hydropower production. **Science of The Total Environment**, v. 659, p. 587 – 598, 2019. 39
- RESTREPO-COUBE, N. et al. What drives the seasonality of photosynthesis across the Amazon basin? a cross-site analysis of eddy flux tower measurements from the Brasil flux network. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 182-183, p. 128–144, 2013. 2
- ROCHA, H. R. et al. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern amazonia. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, p. 22–32, 2004. 2, 46, 78
- \_\_\_\_\_. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in brazil. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 114, n. 1, p. 1–8, 2009. 2, 3, 32, 33, 41, 70
- ROSSATTO, D. R.; HOFFMANN, W. A.; FRANCO, A. C. Differences in growth patterns between co-occurring forest and savanna trees affect the forest-savanna boundary. **Functional Ecology**, v. 23, n. 4, p. 689–698, 2009. 19, 69
- RYAN, M. G.; YODER, B. J. Hydraulic limits to tree height and tree growth. **BioScience**, v. 47, n. 4, p. 235–242, 1997. 71
- SAATCHI, S. et al. Persistent effects of a severe drought on amazonian forest canopy. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 2, p. 565–570, 2013. 1, 40
- SACK, L. Responses of temperate woody seedlings to shade and drought: do trade-offs limit potential niche differentiation? **Oikos**, v. 107, p. 110–127, 2004. 100
- SACK, L. et al. The “hydrology” of leaves: co-ordination of structure and function in temperate woody species. **Plant, Cell & Environment**, v. 26, p. 1343–1356, 2003. 22, 100
- SALAZAR-TORTOSA, D. et al. The “isohydric trap”: a proposed feedback between water shortage, stomatal regulation, and nutrient acquisition drives differential growth and survival of european pines under climatic dryness. **Global Change Biology**, v. 24, n. 9, p. 4069–4083, 2018. 101
- SALESKA, S. R. et al. Amazon forests green-up during 2005 drought. **Science**, v. 318, p. 612, 2007. 1

SANCHO-KNAPIK, D. et al. Ultrasonic spectroscopy allows a rapid determination of the relative water content at the turgor loss point: a comparison with pressure-volume curves in 13 woody species. **Tree Physiology**, v. 33, p. 695–700, 07 2013. 22

SASSAKI, R. M. et al. Effect of water deficiency on photosynthesis of *dalbergia miscolobium benth.*, a cerrado tree species. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 9, n. 2, p. 83–87, 1997. 101

SCHÖNGART, J.; JUNK, W. J. Forecasting the flood-pulse in central amazonia by enso-inices. **Jornal of Hydrology**, v. 335, p. 124–132, 2007. 40, 75

SCHÖNGART, J. et al. Teleconnection between tree growth in the Amazonian floodplains and the El Niño-Southern Oscillation effect. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 683–692, 2004. 2, 27, 39, 40, 69, 71, 72, 75

\_\_\_\_\_. Phenology and stem-growth periodicity of tree species in Amazonian floodplain forests. **Journal of Tropical Ecology**, v. 18, n. 4, p. 581–597, 2002. 2, 15, 20, 25, 27, 28, 40, 69, 72

SCHÖNGART, J.; WITTMANN, F.; WORBES, M. Biomass and NPP of central Amazonian floodplain forests. In: JUNK, W. et al. (Ed.). **Amazonian floodplain forests: ecophysiology, biodiversity and sustainable management**. [S.l.]: Springer, 2010. v. 210, cap. 4, p. 347–388. 40

SCHULTE, P. J.; HINCKLEY, T. M. A comparison of pressure-volume curve data analysis techniques. **Journal of Experimental Botany**, v. 36, n. 10, p. 1590–1602, 1985. 21, 85

SENEVIRATNE, S. I. et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review. **Earth-Science Reviews**, v. 99, n. 3-4, p. 125–161, 2010. 5, 6, 10

SHIN, Y.-J. et al. Application of time-frequency domain reflectometry for detection and localization of a fault on a coaxial cable. **IEEE Transactions on instrumentation and measurement**, v. 54, n. 6, p. 2493–2500, 2005. 10

SILVA, R. P. et al. Uso de banda dendrométrica na definição de padrões de crescimento individual em diâmetro de árvores da bacia do rio Cuieras. **Acta Amazonica**, v. 33, n. 1, p. 67–84, 2003. 19, 41, 50, 52, 69

SOUZA, C. F. et al. Calibração de sondas FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 597–606, 2013. 10

SOUZA, R. A. **Análise da resposta sazonal e interanual da dinâmica florestal utilizando dados do sensor MODIS/MAIAC e medidas in situ em um fragmento de floresta no sudoeste da Amazônia.** 93 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018. 19

STAHL, C.; BURBAN, B.; BOMPY, F. Seasonal variation in atmospheric relative humidity contributes to explaining seasonal variation in trunk circumference of tropical rain-forest trees in french guiana. **Revista Ecologia Tropical**, v. 26, n. 4, p. 393–405, 2010. 17, 70

STEPPE, K. et al. A mathematical model linking tree sap flow dynamics to daily stem. **The Physiology**, n. 1965, p. 257–273, 2005. 17

STERNBERG, L. S. L. et al. Long range lateral root activity by neo-tropical savanna trees. **Plant and Soil**, v. 270, p. 169–178, 2004. 101

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2013. 500 p. 8, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 21, 22

TAVARES, I. B. **Influência da inundação sobre as relações solo-planta-atmosfera em uma planície de alagamento no Tocantins.** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Centro de Ciência do Sistema Terrestre, 2015. 1–45 p. 34

TIAN, H. et al. Effect of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems. **Nature**, v. 396, p. 664–667, 1998. 40

TOCANTINS. **Atlas do Tocantins: subsídios ao planejamento da gestão territorial.** Palmas: Secretaria do Planejamento e da Modernização da Gestão Pública - SEPLAN. Superintendência de Pesquisa e Zoneamento Ecológico-Econômico. Diretoria de Zoneamento Ecológico-Econômico - DZE, 2012. 80 p. 96

\_\_\_\_\_. **Plano de manejo do Parque Estadual do Cantão: revisão.** Palmas: Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2016. 92 p. 30, 32, 40, 42, 77

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Soil hydraulic properties and van genuchten parameters for an oxisol under pasture in central Amazonian. In: GASH, J. H. C. et al. (Ed.). **Amazonian deforestation and climate.** [S.l.]: John Wiley, Chichester, 1996. p. 101–124. 97

TURNER, N. C. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. **Plant and Soil**, v. 58, p. 339–366, 1981. 21, 84

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Instituto de Astronomia, Geografia e Ciências Atmosféricas-IAG. **Base de dados do Instituto de Astronomia, Geografia e Ciências Atmosféricas-IAG**, 2017. Disponível em: <<http://www.iag.usp.br/lcb/>>. Acesso em: 8 out. 2017. 43, 46, 78

VAN DER MAATEN, E. et al. Meteorological forcing of day-to-day stem radius variations of beech is highly synchronic on opposing aspects of a valley. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 181, p. 85–93, 2013. 19

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892–898, 1980. 85

VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. [S.l.]: Environmental Research Laboratory, U. S. Environmental Protection Agency, Ada., 1991. 85 p. 97

VILLAGRA, M. et al. Functional relationships between leaf hydraulics and leaf economic traits in response to nutrient addition in subtropical tree species. **Tree Physiology**, v. 33, p. 1308—1318, 11 2013. 22

WAGNER, F. et al. Pan-tropical analysis of climate effects on seasonal tree growth. **Plos**, v. 9, n. 3, p. 1–16, 2014. 18, 19

\_\_\_\_\_. Asynchronism in leaf and wood production in tropical forests : a study combining satellite and ground-based measurements. **Biogeosciences**, v. 10, p. 7307–7321, 2013. 17, 18, 19

WAGNER, F. H. et al. Climate seasonality limits leaf carbon assimilation and wood productivity in tropical forests. **Biogeochemistry**, v. 13, p. 2537–2562, 2016. 18, 19, 69

WETLANDS, R. C. on. **Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and their Services to People**. Gland, Switzerland: Ramsar Convention Secretariat, 2018. 84 p. 1

WILLIAMS, E. et al. The drought of the century in the Amazon basin: an analysis of the regional variation of rainfall in South America in 1926. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 231–238, 2005. 27, 71

- WILLIAMSON, G. B. et al. Amazonian tree mortality during the 1997 El Niño drought. **Conservation Biology**, v. 14, n. 5, p. 1538–1542, 2000. 1, 40
- WILSON, G. W.; FREDLUND, D. G.; BARBOUR, S. L. Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 2, p. 151–161, 1994. 4
- WITTMANN, F.; ANHUF, D.; JUNK, W. J. Tree species distribution and community structure of central Amazonian várzea forests by remote-sensing techniques. **Journal of Tropical Ecology**, v. 18, n. 6, p. 805–820, 2002. 24, 25, 40
- WITTMANN, F.; JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. The várzea forests in Amazonia: flooding and the highly dynamic geomorphology interact with natural forest succession. **Forest Ecology and Management**, v. 196, n. 2-3, p. 199–212, 2004. 24
- WITTMANN, F.; SCHÖNGART, J.; JUNK, W. J. Phytogeography, species diversity, community structure and dynamics of central Amazonian floodplain forests. In: JUNK, W. et al. (Ed.). **Amazonian floodplain forests: ecophysiology, biodiversity and sustainable management**. London: Springer, 2010. v. 210, cap. 4, p. 61–104. 24
- WORBES, M. Growth rings, increment and age of trees in inundation forests, savannas and a mountain forest in the Neotropics. **IAWA Journal**, v. 10, n. 2, p. 109–122, 1989. 40, 69, 75
- \_\_\_\_\_. The forest ecosystem of the floodplains. In: JUNK, W. J. (Ed.). **Central Amazon floodplain ecology a pulsing system**. Berlin: Springer, 1997. cap. 11, p. 223–266. 2, 20, 28
- WORBES, M. et al. On the dynamics, floristic subdivision and geographical distribution of várzea forests in central Amazonia. **Journal of Vegetation Science**, v. 3, n. 4, p. 553–564, 1992. 25
- YANG, J. et al. Amazon drought and forest response: Largely reduced forest photosynthesis but slightly increased canopy greenness during the extreme drought of 2015/2016. **Global Change Biology**, v. 24, n. 5, p. 1919–1934, 2018. 27, 39, 97
- ZWEIFEL, R. et al. Xylem as the main origin of stem radius changes in Eucalyptus. **Functional Plant Biology**, 2014. 17
- \_\_\_\_\_. Are trees able to grow in periods of stem shrinkage? **The New Phytologist**, v. 211, n. 3, p. 839–849, 2016. 17, 18, 19, 70

ZWEIFEL, R.; ITEM, H.; HÄSLER, R. Stem radius changes and their relation to stored water in stems of young norway spruce trees. **Tree**, v. 15, p. 50–57, 2000. 17, 70

\_\_\_\_\_. Link between diurnal stem radius changes and tree water relations. **Tree Physiology**, v. 21, p. 869–877, 2001. 17, 70

ZWEIFEL, R.; ZIMMERMANN, L.; NEWBERY, D. M. Modeling tree water deficit from microclimate: an approach to quantifying drought stress. **Tree Physiology**, v. 25, p. 147–156, 2005. 18