



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/08.09.22.58-TDI

**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**

Ranieli dos Anjos de Souza Muler

Tese de Doutorado do Curso de
Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto, orientada pela Dra. Laura
de Simone Borma, aprovada em 10
de agosto de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RK95K8>>

INPE
São José dos Campos
2018

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

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Dr. 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:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/08.09.22.58-TDI

**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**

Ranieli dos Anjos de Souza Muler

Tese de Doutorado do Curso de
Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto, orientada pela Dra. Laura
de Simone Borma, aprovada em 10
de agosto de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RK95K8>>

INPE
São José dos Campos
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Muler, Ranieli dos Anjos de Souza.

- M897a 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 / Ranieli dos Anjos de Souza Muler. – São José dos Campos : INPE, 2018.
xxiv + 93 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/08.09.22.58-TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.
Orientadora : Dra. Laura de Simone Borma.

1. Ecofisiologia.
2. Secas sazonais e extremas.
3. Fenologia.
4. Amazônia.
5. Sensoriamento Remoto. I.Título.

CDU 581.5:551.577.38



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): **Ranieli dos Anjos de Souza Muler**

Título: "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"

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

Sensoriamento Remoto

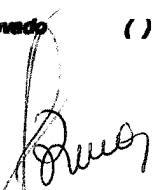
Dr. **Yosio Edemir Shimabukuro**


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

Dr. **Fabien Hubert Wagner**


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

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. **Alessandro Carioca de Araujo**


Convidado(a) / EMBRAPA / Belém - PA

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:


() maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 10 de agosto de 2018

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Sensoriamento Remoto

Dra. Yhasmin Mendes de Moura


Convidado(a) / Lancaster University / Reino Unido - UK
 Participação por Vídeo - Conferência
 Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 10 de agosto de 2018

*“Tudo neste mundo tem o seu tempo; Deus marcou o tempo certo para cada coisa...Então, se
você temer a Deus terá sucesso em tudo”.*

Baseado em Eclesiastes.

Ao meu bom Deus, e família Anjos e Venancio.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por estar comigo em toda esta trajetória do doutorado em Sensoriamento Remoto. Ele tem me sustentado, me guiado, colocado pessoas para me abençoar durante este processo, e principalmente, me fortalecido meio aos desafios tanto de vida enfrentados concomitante ao programa, quanto do próprio programa, marcado por perdas e conquistas.

Agradeço à toda equipe do Instituto Chico Mendes (ICMBio) da Reserva Biológica Rebio Jaru, em Rondônia, em especial à Patrícia (chefe da Rebio Jaru) e ao João Paulo (diretor de pesquisa), aos barqueiros (peixinho, João e Celino), vigilantes e servidores, que sempre nos apoiaram e não mediram esforços para que nossas campanhas pudessem ser realizadas.

Agradeço à equipe do LBA/Rondônia, em especial ao Dr. Alberto Webler e Dra. Renata Aguiar, aos bolsistas (Gabriel, Gutierrez, Bárbara, Camila e demais), e ao apoio incondicional da Dione Ventura nas medidas e campanhas.

Agradeço ao MSc. Valdir Moura pela contribuição nas campanhas finais, pelo incentivo e apoio à esta pesquisa. Ao IFRO pelo termo de cooperação técnica no qual foram cedidos os equipamentos GPS para o levantamento de campo.

Agradeço à minhas irmãs de república Bruna Neves, Aline Jacon e Laura Vedovato pela parceria e amizade. Vocês foram minha família e continuarão sendo apesar da distância.

Agradeço à minha turma SERE/2014, pela união e esforço conjunto para que todos chegassem até o final do programa, e também pelos momentos de diversão. A todos os professores pela construção do nosso conhecimento nesta área. Meu agradecimento especial ao Sacha Siani pelas contribuições nos momentos finais.

Agradeço ao Rennan Paloschi (pelas campanhas também), Letícia e Iane, irmãos de doutorado, pelas discussões, contribuições e amizade. Ao Xico, amigo que ganhei já na etapa final e, que me ajudou com suas conversas e conselhos.

Meu muito obrigada ao Ricardo Dalagnol que além de contribuir para o início deste trabalho na instalação dos equipamentos, forneceu as imagens MODIS/MAIAC as quais processou, e que foram fundamentais para a construção das análises dessa pesquisa. Também sou grata à Fernanda Barros e Paulo Bittencourt (UNICAMP) por compartilhar seus conhecimentos em ecofisiologia e serem parte desse projeto.

Agradeço ao grupo TRopical Ecosystems and Environmental Sciences (TREES) em nome do Dr. Aragão e Dra. Liana, e participantes, que contribuíram com discussões construtivas para esta pesquisa. Agradeço à Dra. Liana e Dr. Ponzoni pela participação nas minhas bancas de qualificação e proposta, contribuindo sempre para o amadurecimento dessa pesquisa.

Agradeço à CAPES por financiar a minha bolsa de estudos, e a FAPESP por financiar o projeto GoAmazon, cujos recursos subsidiaram as campanhas de campo. Meu muito obrigada ao IFRO por conceder afastamento integral para conclusão do doutorado.

Agradeço à minha família (Anjos e Venancio) pelo apoio e amor incondicional, e pela confiança de que tudo valeria a pena.

Agradeço aos membros da banca avaliadora por terem aceitado o convite de fazer parte desta etapa final. E, especialmente à minha orientadora Dra. Laura de Simone Borma, que confiou em mim antes de tudo, me apoiou e não mediu esforços para viabilizar que este trabalho fosse realizado no meu estado, Rondônia. Meu muito obrigada!

RESUMO

Florestas tropicais têm um importante papel no ciclo e estoque de carbono, e na regulação do clima. Nas últimas décadas, severos eventos de seca foram registrados sobre as florestas tropicais amazônicas, a exemplo das secas de 2005, 2010 e 2015/16. Os modelos climáticos têm previsto que estes eventos serão mais frequentes nos próximos anos e reportado, ainda, um aumento na temperatura. Durante períodos de seca, sazonal ou interanual, tem sido observado diferentes respostas da floresta amazônica em termos de capacidade fotossintética do dossel, área foliar, crescimento de madeira e mortalidade. Mas, a dinâmica sazonal da floresta não é impulsionada apenas pela disponibilidade de água, uma vez que sítios de estudo não limitados por água têm mostrado aumento da capacidade fotossintética durante a estação seca, impulsionado pelo aumento de radiação. As questões que envolvem a dinâmica da floresta amazônica sob condições de alterações nos recursos ambientais disponíveis, ainda são objeto de debate. Diante disso, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a resposta sazonal e interanual de um fragmento de floresta de terra firme no Sudoeste da Amazônia à seca, por meio de dados de sensoriamento remoto (SR) e medidas *in situ*. A área de estudo compreende uma parcela de 5 ha localizada no sítio RJA, estado de Rondônia, que foi monitorada entre 2015/17. Inicialmente foram avaliados os aspectos climatológicos do sítio de estudo, e a intensidade do extremo de seca através do índice *Standard precipitation index* (SPI). Em seguida, a resposta da floresta foi avaliada sob quatro pontos de vista: i) resposta fenológica do dossel, tomando como base a variação do índice de vegetação *Enhanced vegetation index* (EVI) e do *Green chromatic coordinate* (Gcc) como *proxy* da capacidade fotossintética e produção de folhas novas, derivados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), com efeitos de nuvens, aerossóis e artefatos da geometria sensor-sol corrigidos pelo algoritmo *Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction* (MAIAC), ii) resposta fisiológica, com uso de medidas de crescimento do tronco, obtidas com dendrômetros pontuais e, produção de serapilheira iii) resposta ecofisiológica, com uso de atributos funcionais indicativos de tolerância à seca (potencial em que a planta perde 50% da condutividade hidráulica (P_{50}), potencial no ponto de perda de turgor (π_{TLP}) e isohidricidade) e iv) propriedades físicas e químicas do solo, além de umidade do solo e profundidade do lençol freático. Os resultados não demonstraram comportamento padronizado da floresta em relação às variações interanuais do clima. Durante o evento de El-Niño de 2015/16 instaurou-se um episódio de seca de grau leve no sítio de estudo entre novembro de 2015 e maio de 2016, nesse período, foi observada uma redução de ~7% na precipitação e aumento médio de ~1°C na temperatura do ar. Na análise em nível de dossel, uma diminuição do EVI (efeito *browning*) foi observada durante a estação seca, com respectivo aumento (efeito *greening*) ocorrendo na estação chuvosa. O EVI foi um melhor indicativo da maturidade foliar, devido apresentar aumento entre três a cinco meses após o pico de produção de folhas novas visto com o Gcc. Os atributos funcionais P_{50} , π_{TLP} e o predominante comportamento anisohídrico (baixa regulação estomática) das espécies arbóreas monitoradas, indicaram que a floresta apresenta grau moderado de resistência à seca no contexto da parcela de estudo, considerando todas as classes de diâmetro. O crescimento médio anual das árvores foi de $0,18 \pm 0,15 \text{ cm.ano}^{-1}$, com menores valores durante a estação seca, e menor incremento entre as espécies de diâmetro < 20 cm. Os atributos funcionais demonstraram que as árvores mais finas são, também, menos resistentes à seca. A água foi o principal fator limitante para a dinâmica da floresta em nível de dossel, uma

vez que, o EVI ($R^2=0,37$) e a serapilheira total ($R^2=0,56$), apresentaram correlação significativa com a precipitação ($\alpha=0,05$), e também em nível fisiológico devido a correlação significativa entre crescimento das árvores e a precipitação ($R^2=0,19$) e umidade do solo ($R^2=0,24$) ($\alpha=0,05$). Durante a ocorrência do episódio de El-Niño em 2015/16, foram observados ΔEVI e ΔGcc negativos. Mas, efeitos no crescimento foram vistos pós El-Niño, sugerindo que a frequência de anomalias negativas na precipitação possa ser crítica para a floresta, independente da intensidade da seca.

Palavras-chave: Ecofisiologia. Secas sazonais e extremas. Fenologia. Amazônia. Sensoriamento Remoto.

ANALYSIS OF SEASONAL AND INTERANNUAL RESPONSE OF FORESTRY DYNAMICS USING MODIS / MAIAC SENSOR DATA AND IN SITU MEASUREMENTS IN A FOREST FRAGMENT IN SOUTHWEST AMAZON

ABSTRACT

Tropical forests play an important role in carbon cycle and stock, and in climate regulation. In recent decades, severe drought events have been recorded on the Amazon rainforest, as in the case of the 2005, 2010 and 2015/16 droughts. The climate models have predicted that these events will be more frequent in the coming years and also reported an increase in temperature. During periods of drought, seasonal or interannual, different responses of the Amazon forest in terms of photosynthetic capacity of the canopy, leaf area, wood growth and mortality have been observed. However, the seasonal dynamics of the forest is not only driven by the availability of water, since study sites not limited by water have shown increased photosynthetic capacity during the dry season, driven by increased radiation. The issues surrounding the dynamics of the Amazon forest under conditions of changes in available environmental resources are still under discussion. The objective of this study was to evaluate the seasonal and interannual response of a dryland forest fragment in the Southwest of the Amazon to drought, using remote sensing (SR) data and in situ measurements. The study area comprises a plot of 5 ha located on the RJA site, state of Rondônia, which was monitored between 2015/17. The climatological aspects of the study site were evaluated, and the intensity of the drought were measured through the Standard Precipitation Index (SPI). Then the forest response was evaluated from four points of view: i) the canopy phenological response, based on the variation of the vegetation index Enhanced vegetation index (EVI) and the Green chromatic coordinate (Gcc) as a proxy for the photosynthetic capacity and the production of new leaves, derived from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor, with effects of clouds, aerosols and sensor-sol geometry corrected by the Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) algorithm; ii) physiological response, using trunk growth measurements, obtained with point dendrometers and litterfall (iii) ecophysiological response, using functional attributes indicative of drought tolerance (water potential in which the plant loses 50% of the hydraulic conductivity (P_{50}), water potential at the turgor loss point (π_{TLP}) and isohydricity) and iv) physical and chemical properties of the soil, as well as soil moisture and water table. The results did not demonstrate standardized forest behavior in relation to interannual climate variations. During the El-Niño event of 2015/16, a mild-grade drought episode was established at the study site between November 2015 and May 2016, during which a reduction of ~7% in precipitation and a mean increase of ~ 1 °C at the air temperature. In the canopy level analysis, a decrease in EVI (browning effect) was observed during the dry season, with a corresponding increase (greening effect) occurring in the rainy season. The EVI was a better indicative of leaf maturity, since it presented increase between three and five months after the peak of new leaf production seen with Gcc. The functional attributes P_{50} , π_{TLP} and the predominant anisohydric behavior (low stomatal regulation) of the monitored tree species indicated that the forest presents a moderate degree of resistance to drought in the context of the study plot, considering all classes of diameter. The average annual growth of the trees was $0.18 \pm 0.15 \text{ cm}\cdot\text{year}^{-1}$, with lower values during the dry season, and smaller increment

among the species of diameter <20 cm. Functional attributes have shown that thinner trees are also less resistant to drought. Water was the main limiting factor for forest dynamics at the canopy level, since EVI ($R^2 = 0.37$) and total litter ($R^2 = 0.56$) presented significant correlation with precipitation ($\alpha = 0.05$), and also at the physiological level due to the significant correlation between tree growth and precipitation ($R^2 = 0.19$) and soil moisture ($R^2 = 0.24$) ($\alpha = 0.05$). During the occurrence of the El-Niño episode in 2015/16, Δ EVI and Δ Gcc negative were observed. However, effects on growth were seen after El Niño, suggesting that the frequency of negative precipitation anomalies may be critical to the forest, regardless of the intensity of the drought.

Keywords: Ecophysiology. Seasonal and extreme droughts. Phenology. Amazon. Remote sensing.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Padrão espacial das anomalias de precipitação calculado entre 1982/2017.	6
Figura 2.2 - Ilustração da dinâmica da floresta durante episódios de seca.....	13
Figura 2.3 - Padrões de similaridade (%) entre os produtos EVI c4 e EVI c5	15
Figura 2.4 – Mudança temporal dos índices de vegetação derivados do MODIS/MAIAC e medidas <i>in situ</i>	16
Figura 3.1 - Localização do sítio RJA.	26
Figura 3.2 - Campanha para coleta de amostras de solo, sítio RJA.	27
Figura 3.3 - Ilustração dos procedimentos de construção do piezômetro.	28
Figura 3.4 - Coletores de serapilheira e localização no sítio RJA.....	32
Figura 3.5 - Metodologia extrair os valores de crescimento do tronco (Cr). P1 a P7 = representam os máximos de	34
Figura 3.6 - Representação do esquema de medida de ar dentro dos ramos.	35
Figura 4.1 – Caracterização hipsométrica do sítio RJA.	39
Figura 4.2 - Série temporal de variáveis climatológicas e índices de vegetação, sítio RJA.	43
Figura 4.3 - Precipitação anual total (ppt) para o sítio RJA.	44
Figura 4.4 - Precipitação média mensal climatológica, sítio RJA.....	45
Figura 4.5 - Padrão temporal de variáveis climatológicas para a série de estudo (2015-2017), sítio RJA.....	51
Figura 4.6 - Crescimento médio mensal acumulado, sítio RJA.	55
Figura 4.7 - π_{TLP} das espécies analisadas (n=21), sítio RJA.	57
Figura 4.8 - Média do π_{TLP} por classe de diâmetro, sítio RJA.....	57
Figura 4.9 - $P_{50médio}$ por espécie (n=10), sítio RJA.....	58
Figura 4.10 - Potencial hídrico foliar diário (Mpa), sítio RJA.	61
Figura 4.11 - Padrão de isohidricidade, sítio RJA.....	62
Figura 5.1 - Padrão sazonal baseado na média histórica das variáveis	65
Figura 5.2 - Esquema do suprimento de água pela planta via lençol freático, precipitação e umidade do solo.....	70

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 – Classes de severidade do <i>Standard Precipitation Index</i> (SPI).	30
Tabela 3.2 – Critério de definição de classes de resistência à seca.	36
Tabela 4.1 – Características das espécies selecionadas para o estudo e critério de seleção.	41
Tabela 4.2 – Fração de serapilheira, sítio RJA.	53
Tabela 4.3 – π_{TLP} e P_{50} por classe de diâmetro, sítio RJA.	59
Tabela A.1 – Coordenadas Geográficas na projeção SIRGAS2000. Horz RMS = erro horizontal; Vert RMS = erro vertical; M1, M2, M3 e M4 representam os limites da sub-parcela permanente (SPP); L1, L2, L3, e L4 representam coletores de serapilheira; * coordenadas obtidas com GPS comum, sem pós-processamento.	89
Tabela B.1 – Análise descritiva do crescimento por período sazonal, sítio RJA. Valores em cm; σ = desvio padrão.	90
Tabela C.1 – Traços ecofisiológicos Ψ_{PD} = <i>Predawn</i> (MPa); Ψ_{MD} = <i>Midday</i> (MPa); P_{50} (MPa); S = período seco; CH = período chuvoso I = comportamento isohídrico; A = comportamento anisohídrico	91
Tabela D.1 –Tabela das correlações entre potencial hídrico foliar diário e variáveis climáticas diárias, sítio RJA. T = temperatura, UR = umidade relativa do ar; R_n = radiação líquida.	92

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AMO	Atlantic Multidecadal Oscillation
BDFFP	Biological Dynamics of Forest Fragments Project
DAP	Diâmetro na altura do peito
Dr	Densidade relativa
EVI	Enhanced vegetation index
EO	Earth observing
ENSO	El Niño-Southern Oscillation
Etp	Evapotranspiração em mm
GCC	Green chromatic coordinate
GPP	Gross primary productivity
GRND	Green-Red Normalized Difference
IVI	Índice de valor de importância
LAI	Leaf área index
LBA	Large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
MAIAC	Multiangle implementation of atmospheric correction
NDVI	Normalized difference vegetation index
NDWI	Normalized difference water index
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OLI	Operational Land Imager
Prp	Precipitação em mm
Rn	Radiação líquida em $W.m^2$
RAINFOR	Amazon Forest Inventory Network
RMBC	Rede brasileira de monitoramento contínuo
sd	Standard deviation
SiF	Solar-Induced chlorophyll Fluorescence
TM	Thematic Mapper
Ta	Temperatura do ar em °C

Ur Umidade do ar em %
Us Umidade do solo em %

LISTA DE SÍMBOLOS

π_{TLP}	Potencial hídrico no ponto de perda de turgor
Ψ_F	Potencial hídrico foliar
Ψ_{PD}	<i>Predawn</i> - Potencial hídrico foliar ao meio dia
Ψ_{MD}	<i>Midday</i> - Potencial hídrico foliar ao amanhecer
D_c	Diâmetro do caule
ΔD_c	Variação do diâmetro do caule

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Secas na Amazônia.....	5
2.1.1 Efeito das secas sobre a floresta: abordagens <i>in situ</i>	7
2.1.2 Efeito das secas sobre a floresta: abordagens com uso do sensoriamento remoto.....	13
2.1.3 Fatores climáticos como limitantes para a dinâmica sazonal da floresta	17
2.2 Produtos de sensoriamento remoto como ferramenta para avaliação da dinâmica de grandes áreas florestadas: vantagens e limitações.....	19
2.3 Métricas e métodos <i>in situ</i> para análise da tolerância à seca.....	21
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1 Área de estudo	25
3.1.1 Condições edáficas	26
3.1.2 Variáveis Climatológicas.....	28
3.1.2.1 Precipitação e evapotranspiração.....	29
3.1.2.2 Severidade da seca.....	29
3.2 Vegetação	30
3.2.1 Seleção de espécies.....	30
3.2.2 Análise do dossel florestal.....	31
3.2.2.1 Serapilheira.....	31
3.2.2.2 Dinâmica do dossel.....	32
3.2.3 Crescimento do tronco (Cr)	33
3.2.4 Atributos funcionais	34
3.3 Análise dos dados	36
4. RESULTADOS	39
4.1 Características da área de estudo	39
4.1.1 Condições edáficas	39
4.1.2 Fitossociologia das espécies monitoradas	40
4.2 Padrões Interanuais e sazonais das condicionantes climáticas e correlações com EVI, Gcc e Etp.....	43

4.3 Medidas <i>in situ</i> e medidas SR.....	50
4.3.1 Variação temporal das medidas <i>in situ</i>	51
4.3.2 Traços de resistência à seca.....	56
4.3.2.1 Ponto de perda de turgor (π_{TLP}).....	56
4.3.2.2 P_{50}	58
4.3.2.3 Isohidricidade.....	59
5. DISCUSSÕES.....	63
5.1 Como é a dinâmica sazonal e interanual da floresta na porção sudoeste da Amazônia?.....	63
5.2 O sensoriamento remoto tem potencial para representar as mudanças fenológicas e fisiológicas da floresta?.....	65
5.3 Quais estratégias da floresta para suportar a seca sazonal?.....	67
6 CONCLUSÕES.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
APÊNDICE A – TABELA DAS COORDENADAS E PARÂMETROS DO GEORREFERENCIAMENTO.....	89
APÊNDICE B – TABELA DE CRESCIMENTO POR PERÍODO SAZONAL E DIÂMETRO.....	90
APÊNDICE C – TABELA DOS TRAÇOS ECOFISIOLÓGICOS POR ESPÉCIE.....	91
APÊNDICE D – TABELA DAS RELAÇÕES ENTRE POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR DIÁRIO E VARIÁVEIS CLIMÁTICAS.....	92
APÊNDICE E - CURVA DIÁRIA POR ESPÉCIE, SÍTIO RJA.....	93

1 INTRODUÇÃO

Florestas tropicais têm um importante papel no ciclo e estoque de carbono (ZHAO et al., 2010), e mais da metade destas florestas estão distribuídas na Amazônia (MALHI et al., 2006). Contudo, este ecossistema está sendo ameaçado pelas mudanças climáticas globais (WAGNER et al., 2014), com projeções de aumento na temperatura e diminuição na precipitação (COSTA; FOLEY, 2000; LI et al., 2008; GLOOR et al., 2015). Desde 1980, a temperatura aumentou cerca de 0,5 °C, com aquecimento mais intenso durante períodos de seca sazonal, e na porção sudeste da bacia amazônica (GLOOR et al., 2015). Análises de longo prazo sugerem que 2015 foi o ano mais quente sobre este bioma no último século (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016). Por outro lado, modelos climáticos indicam uma redução de 0,32% ao ano nas chuvas sobre a Amazônia (LI et al., 2008), coincidindo com registros dos eventos de seca mais intensos ocorridos nas últimas décadas (LEWIS et al., 2011; MARENGO; ESPINOZA, 2016), citando-se, como exemplo, as secas de 1997/98, 2005, 2010 e 2015/2016 (MARENGO et al., 2008; MARENGO; ESPINOZA, 2016; ERFANIAN et al., 2017).

Diante das perspectivas de um clima mais seco e quente na Amazônia (COSTA; FOLEY, 2000; COX et al., 2004; LI et al., 2008; FEARNSSIDE, 2009), uma série de pesquisas têm procurado entender a resposta da floresta a essas alterações. Alguns estudos apontaram para a possível substituição da floresta por uma vegetação mais resistente às secas, do tipo savana, em decorrência da mudança no regime de chuvas, aumento de temperatura e desflorestamento (NOBRE et al., 1991; COX et al. 2004). Por outro lado, outros estudos mostraram que algumas regiões da Amazônia experimentam um leve aumento da evapotranspiração nos períodos de seca sazonal (SHUTTLEWORTH et al., 1988; VON RANDOW et al., 2004; DA ROCHA et al., 2009; RESTREPO-COUBE et al., 2013; CHRISTOFFERSEN et al., 2014), indicando que nos períodos de seca a floresta pode eventualmente crescer.

A resposta do ecossistema amazônico às secas (interanuais e sazonais) tem sido avaliada por meio de diferentes abordagens, tais como medidas *in situ* em parcelas permanentes, dados de torres de fluxo e observações de satélite. Os estudos baseados em dados *in situ* são oriundos, principalmente, das torres de fluxo instaladas pelo Experimento de Grande Escala Biosfera-Atmosfera (*Large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*

- LBA), e de parcelas permanentes como a Rede Amazônica de Inventários Florestais (*Amazon Forest-Inventory Network - RAINFOR*) e *Biological Dynamics of Forest Fragments Project* (BDFFP) p.e. (NEPSTAD et al. 2007; PHILLIPS et al., 2009, 2010; DA COSTA et al. 2010; SAATCHI et al., 2013). Ainda, muitas contribuições surgiram e foram complementadas com análises baseadas em observações de satélites p.e. (HUETE et al., 2006; SALESKA et al. 2007; SAMANTA et al., 2010a; ANDERSON et al., 2010; HILKER et al., 2017; MOURA et al., 2017).

Eventos de seca extremos, como os ocorridos em 2005, 2010 e recentemente em 2015/2016, têm atuado como laboratórios naturais para auxílio no entendimento da dinâmica florestal durante esses episódios climáticos. No entanto, uma série de questionamentos ainda permanecem em aberto. Enquanto alguns autores identificaram uma potencial resiliência da floresta amazônica à seca, em estudos conduzidos em sítios amazônicos, relatando aumento da produtividade primária bruta e evapotranspiração para alguns sítios p.e. (VON RANDOW et al., 2004; ROCHA et al., 2009; CHRISTOFFERSEN et al., 2014), outros apontam para uma diminuição da produtividade primária bruta (RESTREPO-COUBE et al., 2013, 2016), diminuição da evapotranspiração, aumento da mortalidade da floresta p.e. (PHILLIPS et al., 2009, 2010; DA COSTA et al. 2010), e diminuição no crescimento ou produção de madeira p.e. (BRANDO et al., 2008; PHILLIPS et al., 2009, 2010).

O uso do sensoriamento remoto para compreensão dos efeitos das mudanças climáticas sobre a dinâmica florestal é uma abordagem amplamente aplicada na Amazônia (HUETE et al., 2002; SAMANTA et al., 2010a, 2010b, 2012; HILKER et al., 2017). Desde que o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) foi lançado, em 2000, os produtos deste sensor tornaram-se a base de dados mais empregada no sensoriamento remoto da Amazônia (HILKER et al., 2014). Por meio destes produtos, a dinâmica da vegetação p.e. (capacidade fotossintética, área foliar e renovação foliar) é analisada através de índices derivados das observações de satélite, tais como o *Normalized difference vegetation index* (NDVI), o *Green chromatic coordinate* (Gcc), o *Enhanced vegetation index* (EVI) entre outros. Estes índices são calculados a partir de imagens de reflectância do visível e infravermelho próximo, devido à capacidade da clorofila em

absorver radiação visível (400 – 700 nm) e do mesófilo foliar em refletir a radiação infravermelha (700 – 1100 nm) (JENSEN, 2009).

Os estudos baseados na reflectância da vegetação, subsidiados por dados *in situ* obtidos em sítios experimentais amazônicos p.e. (Tapajós e Santarém na Amazônia central, Caxiuanã e Altamira no leste, e Manaus no oeste da Amazônia), sugerem que durante períodos de seca, a floresta apresenta aumento da capacidade fotossintética (*greening*) (HUETE et al. 2006; SALESKA et al., 2007; YANG et al., 2018), enquanto outros estudos evidenciam diminuição da capacidade fotossintética (*browning*) (SAMANTA et al., 2010a, 2010b; GALVÃO et al., 2011; MORTON et al., 2014) e redução da área foliar (ASNER et al., 2004). Grande parte das incertezas na resposta da floresta aos extremos de seca foram relacionadas à capacidade dos sensores remotos em captar processos que ocorrem ao nível de dossel, associadas às interferências atmosféricas p.e. (aerossóis e cobertura de nuvens) e à geometria sensor-sol (GALVÃO et al., 2011; MORTON et al. 2014), que são aspectos inerentes às imagens orbitais.

Visando minimizar as limitações impostas pelas condições atmosféricas para o uso de produtos orbitais, um novo método para processamento dos dados MODIS, o algoritmo *Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction* (MAIAC), proposto por Lyapustin et al. (2011a; 2011b; 2012), tem demonstrado melhorias substanciais em comparação com algoritmos convencionais (BI et al., 2016), por mitigar os efeitos das interferências atmosféricas e melhorar a acurácia da superfície de reflectância sobre vegetações tropicais (HILKER et al., 2012).

As observações de satélite para estudo da fenologia de florestas tropicais com uso de índices de vegetação como *proxy* da capacidade fotossintética, área foliar e renovação foliar, combinadas com dados *in situ*, podem auxiliar a minimizar as incertezas levantadas e melhorar o entendimento biofísico da dinâmica florestal em períodos chuvosos e secos.

Ainda que o sensoriamento remoto tenha promovido um avanço no entendimento dessa dinâmica florestal no contexto amazônico, grande parte dos estudos *in situ* utilizados para validações orbitais foram conduzidos na porção Oriental da Amazônia brasileira, permanecendo uma lacuna de informações no sudoeste da bacia (Amazônia Ocidental). Considerando, ainda, que o impacto causado pelas mudanças no clima não depende

exclusivamente de eventos extremos, mas também, da capacidade das plantas em suportar as mudanças às quais são expostas e, devido o limitado conhecimento da vulnerabilidade de florestas tropicais às secas (IPCC-SREX, 2012; BARROS, 2017), visando compreender melhor a dinâmica clima-vegetação, esta pesquisa se baseou nos seguintes questionamentos: Como é a dinâmica sazonal e interanual da floresta na porção sudoeste da Amazônia? Quais estratégias da floresta para suportar à seca sazonal? O sensoriamento remoto tem potencial para representar as mudanças fenológicas e fisiológicas da floresta? A partir destas questões, esta tese objetivou avaliar a resposta sazonal e interanual de um fragmento de floresta de terra firme localizado na Reserva Biológica do Jaru – Rebio Jaru (sítio RJA), sudoeste da Amazônia. Essa avaliação foi conduzida por meio da análise conjunta de dados obtidos remotamente derivados do sensor MODIS, e corrigidos os efeitos atmosféricos e artefatos da geometria sensor-sol com o algoritmo MAIAC, e dados *in situ* de variáveis do sistema solo-planta-atmosfera.

A análise da dinâmica sazonal da floresta foi avaliada sob quatro diferentes pontos de vista: i) resposta fenológica do dossel, por meio do índice de vegetação *Enhanced vegetation index* (EVI) e *Green chromatic coordinate* (Gcc) como *proxy* da capacidade fotossintética e produção de folhas novas, ii) resposta fisiológica, com uso de medidas de crescimento do tronco e produção de serapilheira, iii) resposta ecofisiológica, com uso de atributos funcionais indicativos de tolerância à seca (potencial em que a planta perde 50% da condutividade hidráulica (P_{50}), potencial no ponto de perda de turgor (π_{TLP}) e isohidricidade) e, iv) propriedades físicas e químicas do solo, além de umidade do solo e profundidade do lençol freático.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Secas na Amazônia

Os eventos extremos de seca e chuva fazem parte do padrão climático da Amazônia os quais estão associados, na maioria das vezes, às alterações na temperatura de superfície (TSM) dos oceanos Pacífico e Atlântico (MARENGO et al., 2005, 2008, 2011). Anomalias de TSM do Oceano Pacífico Tropical são conhecidas como fenômenos do tipo *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO). Em geral, aquecimento anômalo da TSM do Pacífico resulta em eventos do tipo El-Niño, enquanto resfriamento anômalo da TSM resulta na ocorrência de eventos tipo La-Niña.

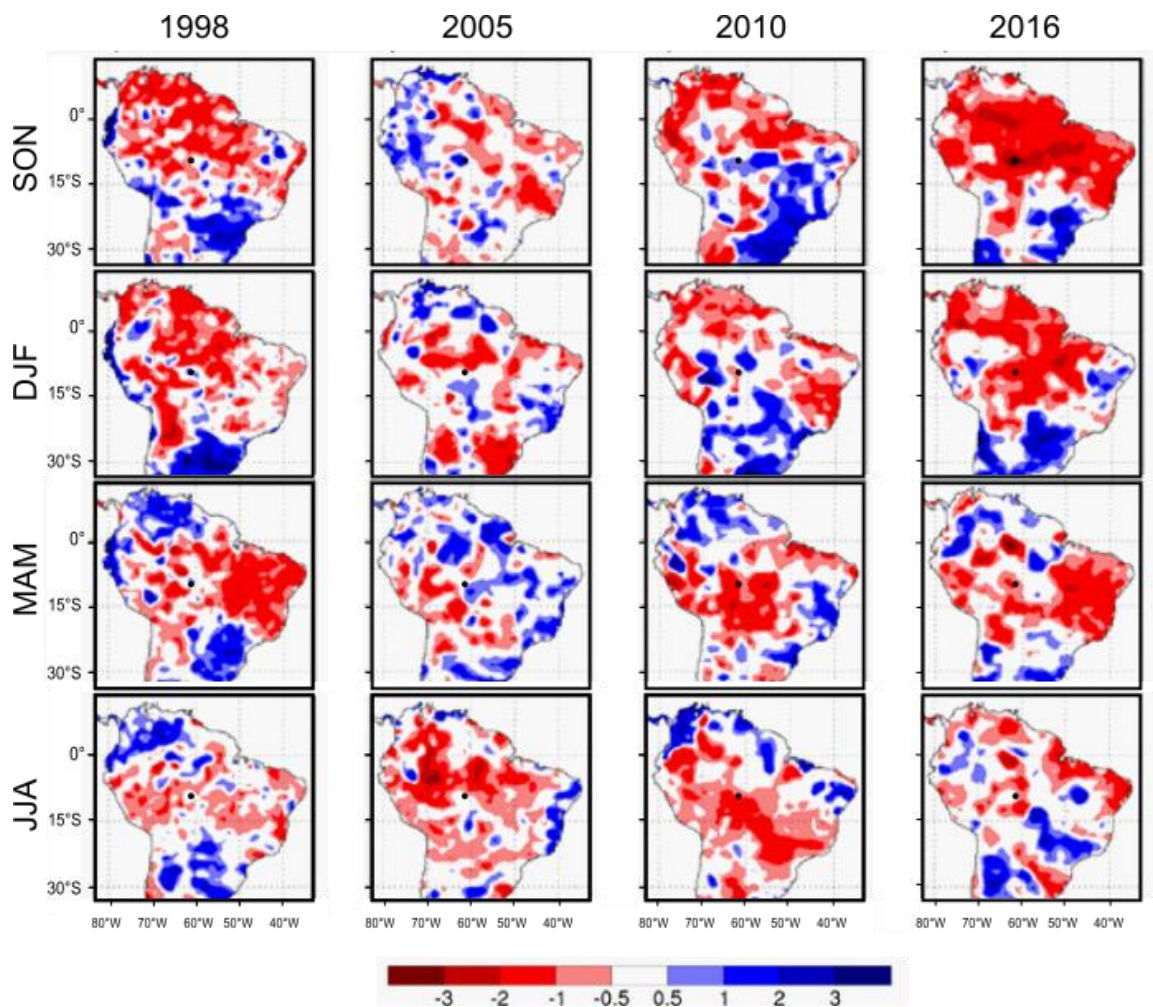
Na Amazônia, os eventos La-Niña têm sido responsáveis por aumento expressivo das chuvas, ao passo que eventos El-Niño e AMO (*Atlantic Multidecadal Oscillation*), em geral, estão associados à ocorrência de secas extremas. Embora ambos produzam diminuição das chuvas, os eventos El-Niño e AMO diferem na distribuição espacial e temporal das secas na Amazônia (BORMA; NOBRE, 2013). Os eventos El-Niño, geralmente influenciam as chuvas da estação chuvosa, eventualmente prolongando-se até a estação seca seguinte. As áreas da Amazônia mais afetadas por esses eventos são as porções norte, nordeste e centro-oeste da Amazônia. É o caso, por exemplo, das secas ocorridas nos anos de 1982/83, 1991/92, 1994/95, 1997/98 e 2015/16 (CAVALCANTI et al., 2013; ERFANIAN et al., 2017). Por outro lado, os eventos AMO, mais raros que os El-Niño, têm mostrado maior influência nas chuvas da estação seca, e atuam mais intensamente nas porções sul, sudeste e sudoeste da Amazônia (MARENGO et al., 2011). É o caso, por exemplo, das secas de 2005 e 2010 (COELHO et al., 2013; LEWIS, et al. 2011; MARENGO et al., 2011).

A seca extrema de 1997/1998 foi associada à ocorrência do El-Niño e também às anomalias de TSM do Oceano Atlântico tropical norte (AMO), atingindo principalmente a região oeste da bacia Amazônica (ARAGÃO et al., 2007), enquanto a seca de 2005 foi impulsionada apenas pelo aquecimento das águas no Oceano Atlântico intertropical (MARENGO et al., 2008) com epicentro na porção central e sudoeste da Amazônia (LEWIS et al., 2011; ERFANIAN et al., 2017). Em 2010, o evento de seca foi associado ao fenômeno El-Niño seguido por anomalias de TSM do Oceano Atlântico (AMO), com

epicentro no sudoeste da Amazônia, centro-norte da Bolívia e estado do Mato Grosso (LEWIS et al., 2011). Mais recentemente, a seca extrema que atingiu a Amazônia em 2015/16, foi associada ao El-Niño, tendo atingido principalmente a porção oriental da Amazônia no período chuvoso (JIMÉNEZ-MUÑOZ, et al. 2016) (Figura 2.1).

A região sudoeste da bacia Amazônica, onde se localiza a área de estudo desta pesquisa, tem sido afetada tanto nos anos de ocorrência de El-Niño e AMO (2002/2003, 2005, 2010 e 2015/2016) (JIMÉNEZ-MUÑOZ, et al. 2016; MULER et al., 2018), quanto em anos de ocorrência de La-Niña (2000) (MULER et al., 2018).

Figura 2.1 – Padrão espacial das anomalias de precipitação calculado entre 1982/2017. Os mapas foram elaborados para os anos de seca Amazônica associadas ao El-Niño e AMO, entre as latitudes 15°N a 30°S e longitude 80° W a 40°W. Ponto preto no mapa representa localização da área de estudo desta pesquisa.



Fonte: Adaptado de Erfanian et al. (2017).

2.1.1 Efeito das secas sobre a floresta: abordagens *in situ*

Diante das perspectivas de um clima mais seco e quente na Amazônia previstas pelos modelos climáticos e, em parte, corroboradas pelos eventos de seca ocorridos nas últimas décadas, os estudos baseados em dados de campo têm buscado compreender a dinâmica da floresta sob condições de seca (PHILLIPS et al., 2009, 2010; WILLIAMSON et al., 2000), e em alguns casos, simulado os efeitos de uma situação extrema e contínua de seca sobre a vegetação (NEPSTAD et al., 2007; DA COSTA et al., 2010), conhecidos como experimentos “seca floresta”. Os estudos *in situ* realizados na Amazônia, visando entendimento da resposta da floresta à seca, basearam-se em medidas de taxas de mortalidade das árvores e, em menor grau, em medidas da resistência das plantas às secas, seja por meio de medidas de crescimento ou da caracterização de atributos funcionais.

Os padrões sazonais na mortalidade de árvores foram avaliados por Williamson et al. (2000), com base em dados de 12 parcelas permanentes de 1 ha cada, instaladas em duas reservas em Manaus, separadas por 12 km. As parcelas fazem parte do *Biological Dynamics of Forest Fragments Project* (BDFFP). Os autores compararam as taxas de mortalidade de árvores largas (≥ 10 cm DAP) antes, durante e depois do evento de seca de 1997, associado ao El-Niño. A taxa de mortalidade média, considerando todas as parcelas (n=12), foi de 1,12% ano⁻¹ pré El-Niño, passando para 1,91% ano⁻¹ no ano de El-Niño (1997) e caindo para 1,23% ano⁻¹ no ano pós El-Niño. Este trabalho sugeriu que o forte evento de seca de El-Niño de 1997/98, teve efeitos de curto prazo, já que as taxas de mortalidade voltaram a cair para 1,23% ano⁻¹ no período pós-seca.

Para avaliar os efeitos da seca sobre a mortalidade da floresta, Nepstad et al. (2007) realizaram o experimento de exclusão de chuva no leste da Amazônia, na Floresta Nacional do Tapajós. Para tanto, utilizaram painéis de plástico instalados no sub-bosque da floresta para isolar uma área de 1 ha, e excluíram cerca de 60% da precipitação incidente em cada estação chuvosa, entre janeiro de 2000 e dezembro de 2004, enquanto outra parcela de 1 ha recebia chuva normalmente. A mortalidade de árvores, para todas as classes de diâmetro, foi cerca de 38% maior na parcela com isolamento (PI) (3,77% ano⁻¹) do que na parcela controle (PC) (2,72% ano⁻¹). Os autores observaram que, dentre as categorias de plantas estudadas (lianas, palmeiras e árvores), as lianas demonstraram maior susceptibilidade à seca, com taxa de mortalidade 70% maior na PI (6,78% ano⁻¹)

em relação à PC (3,78% ano⁻¹). A taxa de mortalidade foi 69% maior na PI para árvores entre 5-10 cm de diâmetro, 98% maior na PI para árvores entre 10-30 cm, e 445% mais alta na PI para árvores > 30 cm. O estudo mostrou, ainda, que a taxa de mortalidade das árvores com diâmetro acima de 10 cm teve início no último ano do experimento, apontando para um período de resiliência da floresta às secas.

Assim como Nepstad et al. (2007), da Costa et al. (2010), isolaram uma parcela de 1 ha, na Floresta Nacional de Caxiuanã, utilizando painéis de plástico instalados a uma altura de 1-2 m, visando excluir 50% da precipitação incidente sobre esta área. Neste caso, a exclusão das chuvas ocorreu de forma contínua durante todo período de estudo, entre janeiro de 2002 e dezembro de 2008. Os autores avaliaram além da mortalidade, aspectos de crescimento de madeira e biomassa acima do solo. Considerando todas as classes de diâmetro, a taxa de mortalidade foi 50% maior na parcela de isolamento (PI) (2,5% ano⁻¹) comparado à parcela controle (PC) (1,25% ano⁻¹). Os resultados deste experimento mostraram que a mortalidade de árvores com diâmetro de 10-20 cm foi de 1,8% ano⁻¹ na PC e 1,2% ano⁻¹ na PI, para árvores entre 20-40 cm a taxa foi de 1,1% ano⁻¹ na PC e 2,6% ano⁻¹ na PI, e árvores > de 40 cm de diâmetro apresentaram taxa de 1,4% ano⁻¹ na PC e 4,1% ano⁻¹ na PI. Ou seja, novamente foi observado um aumento na taxa de mortalidade das árvores maiores, em resposta à seca. Ainda, o crescimento de madeira foi 32% menor na parcela com exclusão de chuva comparada à parcela controle, sendo que as árvores com diâmetro > 40 cm na PI também apresentaram menor (-35%) crescimento de madeira em comparação à parcela controle. Este mesmo padrão foi observado para biomassa acima do solo, em que cerca de 227% da biomassa foi perdida na PI comparada à PC, e a mortalidade de árvores largas contribuiu com 79% da perda de biomassa total na parcela com isolamento. Assim como em Tapajós, a taxa de mortalidade em Caxiuanã só foi estatisticamente significativa entre as parcelas a partir da segunda metade do período de exclusão, ou seja, nos últimos 4 anos do experimento.

Ambos os experimentos “seca floresta” apresentaram respostas similares, apesar do sítio em Tapajós ter excluído as chuvas apenas da estação chuvosa, ter solo mais profundo (~100 m) e argiloso, e ter durado 4 anos a menos que o experimento em Caxiuanã. Ambos os estudos mostraram que as árvores largas são mais sensíveis à seca, e que um aumento considerável na mortalidade foi somente observado após 3-4 anos de exclusão das chuvas,

sugerindo que a floresta seja tolerante à seca até que um extremo quadro de estresse hídrico se instaure no ambiente. A maior vulnerabilidade das árvores largas foi atribuída à maior demanda evaporativa e exigências por transpiração das espécies de dossel dominante, nas quais, devido às maiores alturas, há um caminho mais longo a ser percorrido pela água, através do xilema, o que aumenta a tensão que deve ser aplicada para mover a água do solo até as folhas (DA COSTA et al., 2010).

Com o objetivo de integrar os diversos monitoramentos de longo prazo e com isso produzir uma visão macro sobre os padrões e processos de mortalidade de árvores, Phillips et al. (2010), reuniram dados de 76 parcelas instaladas na bacia Amazônica antes e após a seca severa de 2005, ocorrida na Amazônia. Os referidos autores concluíram que as árvores grandes (≥ 30 cm DAP ou ≥ 40 cm DAP) foram mais vulneráveis à seca em grande parte das parcelas considerando a análise feita em 2009 (PHILLIPS et al., 2009). O estudo observou que o impacto da seca pode ser sentido no período de baixa precipitação, prolongando-se por até dois anos ou mais. Resultado semelhante foi reportado por Saatchi et al. (2013), sugerindo que os efeitos da seca de 2005 persistiram até próximo à seca de 2010.

No que se refere às estratégias da vegetação para lidar com as secas, Rowland et al. (2015), complementaram as análises iniciadas por Da Costa et al. (2010) com o experimento seca floresta em Caxiuanã, buscando avaliar se a falta de carbono ou a falha hidráulica teriam sido a causa principal da mortalidade de árvores. Para isso, Rowland et al. (2015) avaliaram medidas de crescimento das árvores tomadas com dendrômetros de banda, entre janeiro de 2005 a dezembro de 2014. Além disso, realizaram medidas de vulnerabilidade à cavitação e concentração de carboidrato não estrutural (CNE) em algumas árvores das parcelas controle e isolamento, bem como avaliaram as taxas de mortalidade desde janeiro 2002 até novembro de 2014. Após quase 13 anos de dados, foi observado que a perda de biomassa continuou sendo direcionada pela elevada mortalidade de árvores largas, cujo percentual permaneceu maior na parcela com isolamento em comparação à parcela controle. As árvores mantiveram crescimento constante até 4 anos antes de morrer, e não foram observadas diferenças significativas no crescimento das árvores entre as duas parcelas avaliadas (PI e PC). A partir de 2008 – após 4 anos de exclusão de chuva - o crescimento das árvores menores aumentou com a

mortalidade de árvores maiores, ou seja, com a falha no dossel a maior disponibilidade de radiação para árvores de sub-bosque e redução na competição por água e nutrientes possibilitou elevar as taxas de crescimento mesmo sob condições extremas de seca. Os autores concluíram que a falha hidráulica – que pode levar à cavitação, mais do que a falta de carbono, causam a mortalidade de árvores em florestas tropicais.

Na Amazônia boliviana, Doughty et al. (2014) avaliaram dados de produtividade primária líquida (NPP) em duas parcelas de 1 ha durante o ano de seca extrema ocorrido em 2010. Os autores admitiram NPP_{total} como a soma do crescimento de madeira (medido com dendrômetros de banda), produção de folhas novas (obtida por uma equação que considera as medidas de serapilheira e área foliar) e crescimento de raízes finas. Os resultados demonstraram declínio na produção de madeira durante a estação seca, mas NPP_{total} permaneceu constante, indicando que o declínio no crescimento das árvores sugere uma alocação de recursos para produção de folhas e raízes do que um declínio na produtividade propriamente dito.

O estudo realizado por Restrepo-Coupe et al. (2013), conduzido nos sítios LBA localizados em Manaus (k34), Tapajós (k67, k77, k83), Rio Javaes Bananal (JAV), Caxiuanã (CAX), Fazenda Nossa Senhora (FNS), Rebio Jarú (RJA) e Pé de Gigante (PDG-Cerrado), trouxe uma importante contribuição em relação à dinâmica sazonal da floresta no contexto amazônico. Os autores observaram, com dados das torres de fluxo, que durante o período seco a produtividade primária bruta (GPP) aumenta nos sítios equatoriais (k34, k67, k83 e CAX) e a sudeste (JAV), com exceção do sítio convertido em agricultura (k77), e diminui nos sítios a sudoeste (RJA e FNS). A produção de folhas novas (*leaf flush*) ocorre fora de fase com o crescimento de madeira (vista nos sítios k67, k83 e k34), mas este padrão pode ser alterado em regiões onde outras limitações de recursos tornam-se mais proeminentes do que a limitação por radiação, a exemplo das áreas alagadas (sítio JAV). Por outro lado, os autores observaram que nos sítios onde a radiação possui pouca sazonalidade, a exemplo do sítio RJA, o *leaf flush* durante o período seco, modulado pela radiação, não seria uma estratégia vantajosa, mas esta hipótese não foi confirmada devido ausência de dados de serapilheira e crescimento de madeira (RESTREPO-COUBE et al., 2013). Desta forma, no sudoeste da Amazônia, permanece a questão se esta região é verdadeiramente limitada por água, uma vez que, a

produtividade primária apresenta declínio na estação chuvosa e os solos são mais rasos do que os outros sítios equatoriais (VON RANDOW et al., 2004; RESTREPO-COUBE, et al, 2013).

A partir das análises já realizadas sobre as florestas tropicais amazônicas, depreende-se que há um grande conjunto de dados explorados nos sítios localizados na porção Oriental da Amazônia p.e. (Manaus, Tapajós, Santarém e Caxiuana). Estes dados possibilitaram compreender as variações sazonais da mortalidade de árvores, crescimento de madeira, biomassa acima do solo entre outros parâmetros, como resposta à seca. Na porção Ocidental da bacia, no sítio Rebio Jaru (RJA), a maioria dos trabalhos foram realizados na antiga localização da torre de fluxo, que foi alterada em 2004. Os resultados dos estudos conduzidos neste sítio são convergentes quanto ao declínio na GPP durante a estação seca (RESTREPO-COUBE et al., 2013, 2016). Contudo, estudos divergem quanto à ocorrência de diminuição na evapotranspiração (Etp) (COSTA et al., 2010) ou aumento durante a estação seca (VON RANDOW et al., 2004; ANDRADE et al., 2009), atribuindo para os casos de incremento na Etp a capacidade de raízes profundas em captar água de camadas profundas do solo (VON RANDOW et al., 2004). O aumento na produção de serapilheira também foi observado por Freite (2017) durante a estação seca, mas análises que buscam investigar a dinâmica deste fragmento de floresta como resposta às secas extremas e sazonais ainda não foram tão exploradas neste sítio.

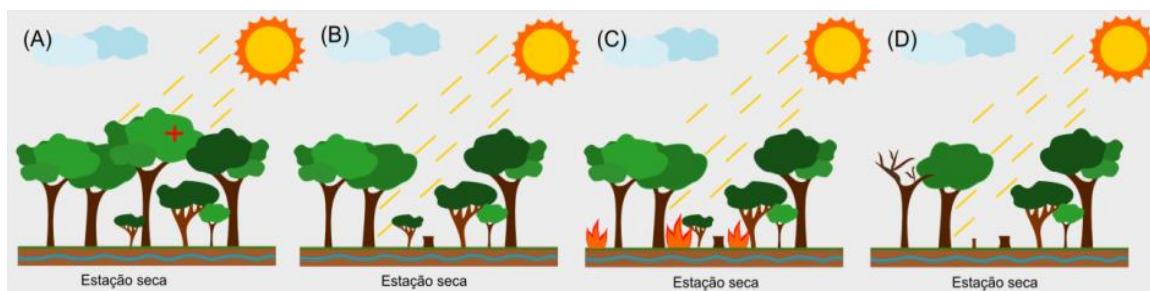
As secas severas têm mostrado uma atuação seletiva entre as classes de diâmetro das árvores, neste caso, a maior suscetibilidade de árvores grandes à mortalidade pode ser um fator de risco à biodiversidade Amazônica (PHILLIPS et al., 2009, 2010), devido à mortalidade destas árvores implicar em mudança na estrutura e composição da floresta, e no conteúdo de carbono (NEPSTAD et al., 2007). Como resultado disso, nas próximas décadas a floresta poderá passar por uma acelerada perda de biomassa, que consequentemente mudará a estrutura para uma floresta com menor estatura e com menor biomassa florestal (ROWLAND et al., 2015).

As diferenças na vulnerabilidade da floresta a uma diminuição das chuvas podem ser devidas às diferenças na capacidade da planta em atrasar o início do estresse à seca ou na sua habilidade para manter as funções enquanto perde água (KURSAR et al., 2009). Para se adaptar e sobreviver aos períodos de seca, as plantas apresentam diferentes estratégias

de adaptação, tais como: *i*) captar água do solo e manter suas funções metabólicas e as taxas de evapotranspiração (BRUNO et al., 2006; DA ROCHA et al., 2009; NEPSTAD et al., 2007); *ii*) produzir raízes mais profundas (*tap roots*) para captar água de camadas profundas e potencialmente mais úmidas do solo (METCALFE et al., 2008); *iii*) perder folhas para controlar o estresse de umidade (LARCHER, 2000); ou *iv*) fazer uso do estoque de carboidratos não-estruturais para manter seu metabolismo (DOUGHTY et al., 2014).

Com as limitações na disponibilidade de água intensificadas em períodos de seca sazonal ou interanual, uma série de hipóteses da resposta das florestas a este aspecto limitante foram testadas e reportadas na literatura. Em síntese, estas pesquisas apontam para a tendência de diminuição nas taxas de crescimento (NEPSTAD et al., 2002, 2004) e aumento na mortalidade de árvores largas (NEPSTAD et al., 2007; PHILLIPS et al., 2009; ROWLAND et al., 2015), que seriam mais suscetíveis à morte devido à maior demanda evaporativa (FISHER et al., 2007; PHILLIPS et al., 2009; DA COSTA et al., 2010) (Figura 2.2 A), por estarem mais suscetíveis às demandas da atmosfera p.e. (radiação solar, vento, déficit de pressão de vapor, entre outras), e pelo risco de deterioração dos tecidos do xilema, podendo levar à cavitação (formação de bolhas no xilema) (ROWLAND et al., 2015). Esse efeito tende a acionar uma reação em cadeia, uma vez que a mudança na estrutura do dossel, por mortalidade ou deciduidade foliar, resulta em maior penetração de radiação solar através do dossel (ANDERSON et al., 2010; MALHI et al., 2009) (Figura 2.2 B), mais biomassa seca significa maior potencial ao fogo (ARAGÃO et al., 2007) (Figura 2.2 C), na ocorrência de queimada mais árvores podem morrer (BRANDO et al., 2012) (Figura 2.2 D), e assim, elevar ainda mais o grau de impacto à floresta a cada evento de seca. Quanto maior o nível de degradação da floresta, maior poderá ser o impacto das secas, pois, florestas maduras e intactas retêm umidade de maneira mais efetiva que áreas fragmentadas ou degradadas (WILLIAMSON et al., 2000).

Figura 2.2 - Ilustração da dinâmica da floresta durante episódios de seca. Sinal '+' representa árvores mais suscetíveis à morte.



Fonte: Produção da autora.

2.1.2 Efeito das secas sobre a floresta: abordagens com uso do sensoriamento remoto

Dada a importância das secas para as florestas tropicais, o entendimento dos seus efeitos sobre este bioma ainda está em construção. Estudos *in situ*, como relatados no item 2.1.1, são difíceis de examinar em larga escala espacial e temporal, devido isso, grandes avanços têm sido realizados com uso de abordagens baseadas em sensoriamento remoto. O sensoriamento remoto é, portanto, uma importante ferramenta para a compreensão da dinâmica florestal amazônica. Primeiro, por fornecer dados em escala temporal e espacial satisfatórios mediante a extensão do bioma. Segundo, porque é possível monitorar os processos fisiológicos da floresta em resposta às mudanças climáticas (ASNER et al., 2004).

Os índices de vegetação (IVs), cujas métricas são geradas com uso de imagens orbitais, são importantes técnicas de análise da estrutura e bioquímica da floresta (GALVÃO et al., 2011). Entre eles, destaca-se os IVs comumente utilizados como *proxy* do funcionamento da vegetação em termos de capacidade fotossintética da floresta e área foliar, quais sejam, o *Enhanced Vegetation Index* (EVI), e o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Esta associação é possível, porque a resposta espectral captada pelo sensor é resultado da interação da radiação eletromagnética com os componentes internos da folha (pigmentos e tecidos). No contexto Amazônico, a fenologia dos dosséis florestais é, portanto, o processo mais estudado com uso de produtos derivados de sensoriamento remoto.

Com o advento do sensoriamento remoto, avanços significativos foram obtidos pela

integração de dados de campo e orbitais, gerando uma grande oportunidade para analisar sazonalmente a dinâmica da floresta durante os principais eventos de seca ocorridos sobre a Amazônia nas últimas décadas p.e. (1997/98, 2002/03, 2005, 2010 e 2015/16).

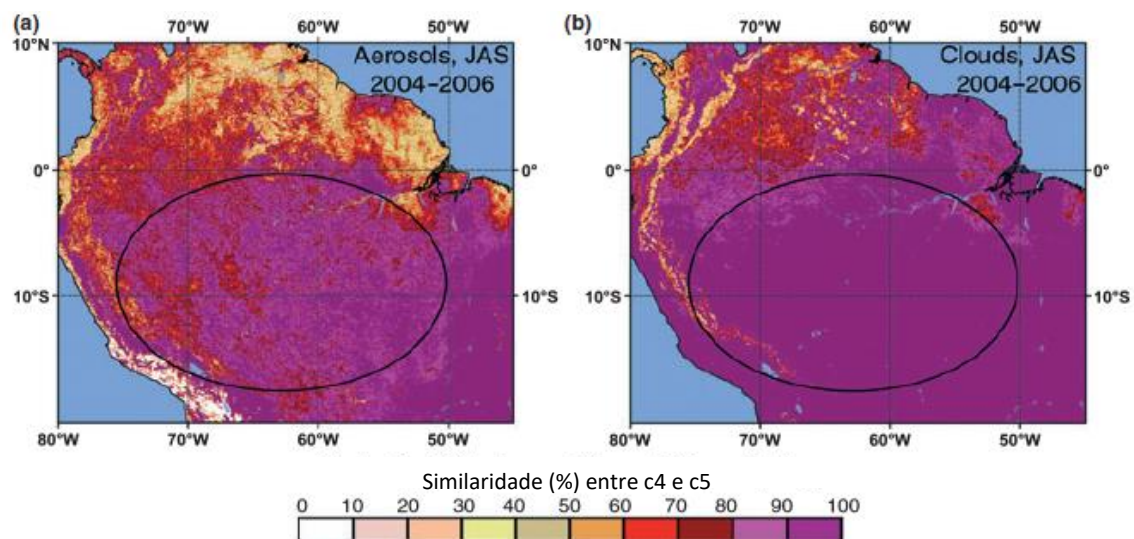
Com uso do índice EVI derivado do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), entre os anos 2000 e 2005, Huete et al. (2006) observaram aumento do EVI (também chamado *greenning*) em 48% da bacia Amazônica. Os autores analisaram a correlação desses resultados com medidas de produtividade primária (*Gross primary productivity* - GPP) obtidas das torres de fluxo instaladas em 6 sub-parcelas de áreas onde estudos do LBA são desenvolvidos, obtendo uma correlação $R^2=0.50$ entre GPP (*in situ*) e EVI (orbital). Esta análise sugeriu que o aumento na capacidade fotossintética durante a estação seca ocorre pelo fato da luz solar exercer mais influência do que a chuva na produtividade e fenologia de florestas tropicais.

Corroborando os resultados de Huete et al. (2006), Saleska et al. (2007), por meio do produto EVI c4 MODIS entre os anos 2000 e 2006, buscou investigar se a seca de fato induz a um aumento da capacidade fotossintética no dossel. Como resultado, foi observado um aumento do EVI sobre as áreas de florestas intactas afetadas pela seca de 2005. Contudo, o uso do produto EVI c4 MODIS para avaliar a resposta da vegetação às mudanças climáticas foi bastante questionado pela comunidade científica (ANDERSON et al., 2010; MORTON et al., 2010; SAMANTA et al., 2010^a, 2010^b), resultando em questionamentos sobre as conclusões desses estudos em relação à resposta da floresta amazônica à seca de 2005. Samanta et al. (2010^a, 2010^b) reavaliaram o potencial do produto EVI c4 MODIS e do seu substituto EVI c5 MODIS (transição com algoritmos de melhores filtragens para nuvens e aerossóis) para verificar, entre outros fatores, qual fração da floresta intacta realmente impactada pela seca teria exibido anomalia positiva no EVI (*greenning*) em 2005. Os resultados desses estudos mostraram que apenas 11%-12% da floresta Amazônica mostrou *greenning*, ao passo que 28%-29% mostrou *browning* ou nenhuma mudança. Quanto ao percentual restante, detectou-se que os dados não possuíam qualidade suficiente para caracterizar qualquer efeito no dossel, concluindo que não é possível afirmar que houve *greenning* em larga escala na Amazônia, uma vez que grande parte dos dados válidos não existiam.

Na tentativa de esclarecer estas questões, Anderson et al. (2010), por meio da reanálise do EVI c4 MODIS e análise do EVI c5 MODIS, bem como pela avaliação de outras métricas (NDVI e NDWI) acopladas a medidas *in situ*, sugeriram que anomalias positivas do EVI durante períodos de seca podem estar relacionadas com a mudança na estrutura do dossel. Esta mudança se daria pela diminuição da heterogeneidade do dossel devido à mortalidade de árvores de dosséis dominantes e pelo caráter decíduo de algumas espécies para enfrentar o estresse hídrico. A combinação entre mortalidade de alguns indivíduos e perda de folhas em outros provavelmente diminuiu o efeito sombra, ocasionando a aparente resposta positiva pelo aumento da reflectância. Os autores observaram que regiões com altas taxas de mortalidade tendem a ter anomalias positivas de EVI e negativas de NDWI, concluindo que anomalias positivas em índices de vegetação por si só não indicam que a floresta é resiliente à seca.

As informações produzidas com o produto EVI c4 MODIS possuem contaminação por nuvens e aerossóis e precisam ser tratadas com cautela. O produto EVI c5 MODIS apresenta evidências de melhores correções da contaminação atmosférica, principalmente em relação à aerossóis, com considerável diferença entre eles (Figura 2.3).

Figura 2.3 - Padrões de similaridade (%) entre os produtos EVI c4 e EVI c5. (a) comparação de aerossóis entre as imagens; (b) comparação de nuvens entre as imagens.

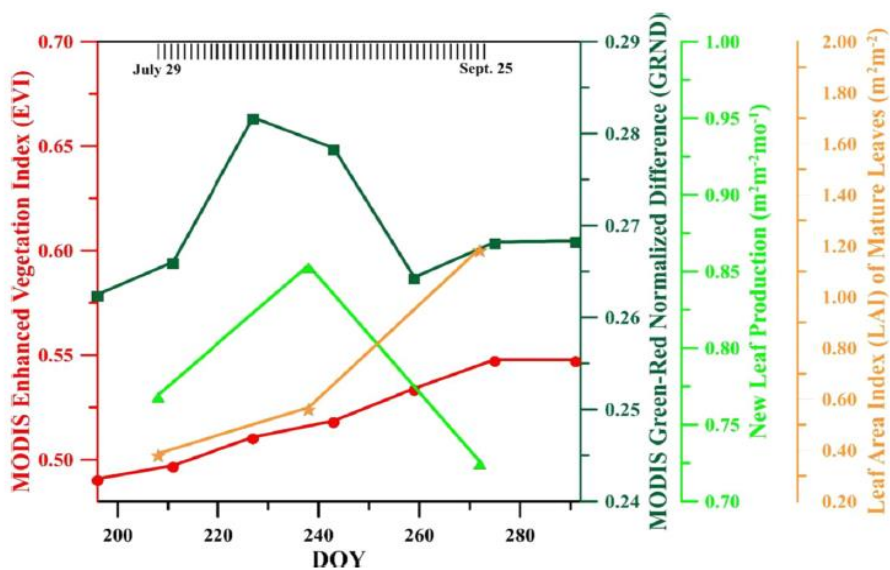


Fonte: Adaptado de Samanta et al. (2010b).

Em função do debate e das distintas respostas da floresta, identificadas com abordagens orbitais, Galvão et al. (2011), Morton et al. (2014) e Bi et al. (2015) avaliaram a influência da geometria na aquisição de dados e seus efeitos sobre o cálculo dos índices de vegetação. Uma vez corrigidos os efeitos de geometria sensor-sol o aparente aumento da capacidade fotossintética desaparece (GALVÃO et al., 2011; MORTON et al., 2014), contudo, a questão parece não ter sido resolvida a partir desta perspectiva, já que, para Bi et al. (2015) os efeitos angulares já são considerados pelos algoritmos de produção dos produtos EVI/MODIS, reafirmando a ocorrência de *greening* durante a estação seca.

Análises baseadas em índices do espectro visível também foram realizadas por Moura et al. (2017), com uso do *Green-Red Normalized Difference* (GRND) e EVI, durante a seca de 2012 na Amazônia Oriental. Os autores instalaram uma câmera hiperespectral na torre k67 no Tapajós, das quais foram derivados os índices de vegetação, e compararam os resultados com os índices derivados das imagens MODIS/MAIAC. Também foram modelados dados de área foliar (LAI) e *leaf flush* em nível de superfície. Os resultados mostraram que o EVI acompanha as mudanças na área foliar de folhas maduras, e o GRND foi relacionado com o *leaf flush*, corroborando as evidências de Lopes et al. (2016). Durante a seca, observou-se aumento na produção de folhas novas, e aumento da capacidade fotossintética no final desta estação (Figura 2.4).

Figura 2.4 – Mudança temporal dos índices de vegetação derivados do MODIS/MAIAC e medidas *in situ*.



Fonte: Adaptado de Moura et al. (2017).

A abordagem com uso do produto *Sun-induced chlorophyll Fluorescence* (SiF, sensor GOME-2), que é uma medida direta da capacidade fotossintética da floresta baseada na fluorescência da clorofila, apresenta-se como uma alternativa promissora para entendimento da resposta da floresta à seca, em particular na identificação de áreas de *greening* e *browning* (GUAN et al., 2015; BERTANI et al., 2017). Bertani et al. (2017) observaram, com uso do SiF, que o aumento da capacidade fotossintética (*greening*) é o efeito que predomina durante a estação seca na Amazônia, mas o pico da capacidade fotossintética ocorre no início da estação chuvosa em 58% da região. Esta nova abordagem confirma os estudos baseados em produtos derivados do sensor MODIS, cujos resultados chegaram a uma conclusão similar (HUETE et al., 2006; SALESKA et al., 2007; WAGNER et al., 2017), e evidencia o potencial dos dados MODIS para o monitoramento contínuo das florestas tropicais, dada a sua melhor resolução espacial e temporal.

A partir do exposto, observa-se que os dados de satélite têm permitido identificar as variações interanuais e sazonais que ocorrem na floresta amazônica sob diferentes abordagens p.e. (LAI, conteúdo de clorofila, capacidade fotossintética, produção de novas folhas, produtividade primária bruta, entre outras). Porém, os processos biológicos subjacentes à esta dinâmica ainda são matéria de debate e carecem de maiores validações dos produtos de SR com dados de campo. No entanto, dados de campo de larga escala na Amazônia são difíceis de obter. Assim, produtos de SR que permitam análises na escala de *plot* – como é o caso dos IVs – a despeito dos questionamentos, ainda se apresentam como uma alternativa promissora.

2.1.3 Fatores climáticos como limitantes para a dinâmica sazonal da floresta

O crescimento de uma planta pode ser definido como o aumento nas suas dimensões, p.e. altura e diâmetro, ao longo do tempo. E uma característica marcante das plantas é que elas crescem continuamente durante toda vida. Embora nem todas as partes cresçam continuamente e, nem todo crescimento ocorra ao mesmo tempo, as plantas, em geral, têm habilidade de se desenvolver enquanto permanecem vivas (LARCHER, 2000, p. 295), utilizando para isso, recursos como água, radiação e nutrientes (TOLEDO et al., 2011).

A dinâmica florestal tem sido estudada em conjunto com observações climáticas, seja no aspecto fenológico (sazonalidade da produção de novas folhas e queda foliar) (LOPES et al., 2016; WAGNER et al., 2016; MOURA et al., 2017), seja no aspecto de crescimento do tronco (WAGNER et al., 2012; WAGNER et al., 2016). O ponto em comum é que, estes estudos buscam compreender a resposta da floresta no contexto das secas sazonais e potenciais efeitos das mudanças climáticas.

Recentes análises dos fatores limitantes da dinâmica florestal concentram-se, principalmente, em estudos baseados nos produtos de sensoriamento remoto (JONES et al., 2014; GUAN et al., 2015; WAGNER et al., 2016; BERTANI et al., 2017), devido estes produtos possibilitarem uma avaliação em nível amazônico. Guan et al. (2015) constataram, com uso do SiF, que a radiação solar é o principal fator de controle da sazonalidade de 56% da floresta tropical amazônica, embora, no contexto das florestas tropicais o fator limitante que prevalece seja a água. Bertani et al. (2017), também por meio do SiF, sugerem que 76% da sazonalidade da fotossíntese é explicada pela radiação solar, 13% pela precipitação e 11% por ambos. Já os estudos utilizando o algoritmo de correção MAIAC, para remover os artefatos radiométricos e atmosféricos presentes nos produtos MODIS, têm mostrado evidências de que na Amazônia 70,4% da sazonalidade da fotossíntese é explicada por variações na radiação solar (WAGNER et al., 2017). Estes estudos baseiam-se em dados *in situ*, localizados em sítios LBA e BDFFP, para validação das observações orbitais.

Na tentativa de definir as áreas amazônicas limitadas por água ou radiação, Bertani et al. (2017), indicaram que a precipitação média capaz de manter o estado sempre-verde da floresta é de 1.943 mm.ano⁻¹, próximo ao valor encontrado por Guan et al. (2015) (2.000 mm.ano⁻¹). Acima de 3.275 mm.ano⁻¹ a produção de folhas novas depende quase que exclusivamente da radiação solar incidente, e abaixo de 1.635 mm.ano⁻¹ esta produção é limitada apenas por água (BERTANI et al., 2017). No entanto, esses produtos são fornecidos em resolução espacial muito baixa (40 Km), limitando este tipo de análise à extensas áreas florestadas.

Experimentos em escalas locais também têm demonstrado que a radiação é o principal fator limitante da floresta Amazônica (MACHADO et al., 2017 em Santarém; HILKER

et al., 2017 em Santarém e Manaus). Mas estas análises ainda são escassas em nível regional, especialmente, na porção sul da bacia Amazônica.

Baseado em Guan et al. (2015), Wagner et al. (2017) e Bertani et al. (2017), depreende-se, mas sem encerrar a questão, que na Amazônia, a sazonalidade da radiação solar incidente é o fator que predominantemente direciona a sazonalidade da fotossíntese durante períodos de seca sazonal, seja avaliada pelo EVI, seja pelo SiF, e que neste período, predomina também, o aumento da capacidade fotossintética (*greening*). Isto porque 59% da Amazônia encontra-se acima do limiar de $2.000 \text{ mm.ano}^{-1}$ (GUAN et al., 2015).

2.2 Produtos de sensoriamento remoto como ferramenta para avaliação da dinâmica de grandes áreas florestadas: vantagens e limitações

O MODIS tem sido o produto de sensoriamento remoto mais consolidado entre as pesquisas que visam investigar as diferentes dinâmicas que ocorrem sobre a superfície terrestre, em especial sobre florestas tropicais. A partir das imagens obtidas pelo sensor MODIS, a bordo do satélite Terra (sigla inicial dos produtos MOD) e Aqua (sigla inicial dos produtos MYD), diversos produtos são gerados e disponibilizados na plataforma da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), a exemplo dos produtos atmosféricos p.e. (aerossol MOD04; máscara de nuvens MOD35), terrestres p.e. (índices de vegetação MOD13/MYD13; GPP MOD17/MYD17), da criosfera p.e. (cobertura de neve MOD10/MYD10) e oceânicos p.e. (temperatura de superfície do mar, sem sigla). Estes produtos são disponibilizados em diferentes resoluções espaciais, que variam de 250 m a 1 km.

Com objetivo de minimizar os efeitos da contaminação atmosférica inerente às imagens, cujos efeitos limitam a interpretação dos produtos orbitais, uma gama de coleções dos produtos MODIS foram geradas, como resultado das implementações nos algoritmos de correção atmosférica, desenvolvidos e melhorados ao longo dos anos. Apesar do MODIS apresentar moderada resolução espacial, para estudos em determinadas escalas, a sua alta resolução temporal (diária) possibilita a geração de produtos (em composições de 8 a 16 dias) com informações climáticas e de uso e cobertura da terra. Suas constantes revisitas, permitem, ainda, a modelagem de variáveis ambientais com uso de imagens com menor

interferência atmosférica, principalmente em regiões Amazônicas durante períodos de alta precipitação, na qual imagens derivadas do *Thematic Mapper* (TM) e *Operational Land Imager* (OLI) por exemplo, são geradas com alto percentual de nuvens.

As interferências atmosféricas têm sido bastante discutidas (ANDERSON et al., 2010; SAMANTA et al., 2010a, 2010b; GALVÃO et al., 2011; MORTON et al., 2014) em virtude de, em alguns casos, levar a interpretações inconsistentes das respostas sazonais da vegetação mediante limitações de água e radiação. Diante disso, diversos estudos têm buscado melhorias nos modelos de correção (LEVY et al., 2007; LYAPUSTIN et al., 2008, 2011a, 2011b, 2012), visando eliminar ao máximo os efeitos atmosféricos intrínsecos à imagem orbital. O *Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction* (MAIAC) é o mais recente algoritmo de correção atmosférica, amplamente utilizado para gerar estimativas que envolvem a capacidade fotossintética do dossel e outras métricas (HILKER et al., 2010; MOURA et al., 2015). A maior confiabilidade atribuída a este algoritmo se dá devido ao aumento na precisão da reflectância de superfície, por normalizar a geometria do sensor para a vista do nadir e o ângulo do zênite solar de 45°, excluindo a questão da variação da geometria do sensor solar nos produtos padrão MODIS (BI et al., 2015). Neste sentido, MAIAC possibilita novas oportunidades para explorar a capacidade multi-ângulo do MODIS (HILKER et al., 2017).

Recentes análises, com uso de produtos MODIS, corrigidos com o algoritmo MAIAC, associados à dados *in situ* e a medidas com câmeras hiperespectrais em escala local, têm mostrado consistência nos seus resultados (LOPES et al., 2016; HILKER et al., 2017; MOURA et al., 2017; WU et al., 2018), demonstrando que a fenologia do dossel explica grande parte dos padrões observados remotamente. Um grande avanço neste sentido, é que o EVI derivado do MODIS/MAIAC tem mostrado relação com a área foliar madura (p.e. LAI e GPP) (WU et al., 2016; MOURA et al., 2017); o NDVI apresenta relação direta com o conteúdo de clorofila p.e. (*leaf flush*) (HILKER et al., 2017); e outros índices p.e. (*Green chromatic coordinate – Gcc* e *Green-Red Normalized Difference - GRND*) baseados na álgebra de bandas do espectro visível, sugerem uma relação com a produção de novas folhas (LOPES et al., 2016; MOURA et al., 2017).

A despeito de todos avanços mencionados, o SiF tem gerado novas oportunidades de monitoramento da capacidade fotossintética da floresta vista do espaço, devido ser uma

medida mais direta da fotossíntese (LUUS et al., 2017). Estudos conduzidos em diferentes biomas mostram uma relação significativa da fluorescência (SiF) com medidas de produtividade primária bruta (GPP), demonstrando que o SiF responde rapidamente às transições sazonais da capacidade fotossintética, e que produtos baseados na reflectância p.e. (EVI, NDVI e Gcc) apresentam um atraso na resposta da GPP devido se basearem nas propriedades do dossel que incluem área foliar e conteúdo de clorofila (LI et al., 2017; LUUS et al., 2017; LU et al., 2018; MACBEAN et al., 2018). Por outro lado, medidas derivadas do MODIS têm contínua resolução temporal e espacial, e dados por um período muito mais longo (2000 até o presente) (LI et al., 2017).

2.3 Métricas e métodos *in situ* para análise da tolerância à seca

Florestas tropicais têm mostrado vulnerabilidade ao aumento de estresse de umidade (PHILLIPS et al., 2009), e esta condição de vulnerabilidade tem sido avaliada, principalmente, com uso de métricas fisiológicas como crescimento em biomassa (BRANDO et al., 2008; PHILLIPS et al., 2009, 2010), que apresentam dormência ou diminuição do tronco como resposta à seca; e por meio de atributos funcionais de tolerância à seca, que avaliam o potencial hídrico da planta como resposta aos fatores ambientais (BARTTLET et al., 2012; CHOAT et al., 2012).

O crescimento das árvores é um dos processos mais estudados na ciência florestal (CHAN et al., 2016), baseados em estudos que objetivam monitorar o crescimento do tronco em diversificados períodos de tempo (OFFENTHALER et al., 2001). Contudo, a interpretação destas medidas é dificultada pela ocorrência de dois processos: a expansão irreversível e reversível. A primeira, também chamada de incremento radial, relaciona-se com o acúmulo de madeira e tecidos na casca; já a segunda, é causada pelo desequilíbrio entre transpiração e absorção de água pelas raízes, promovendo inchaço e encolhimento do tronco (ZWEIFEL et al., 2005, 2015).

Para obtenção da medida do diâmetro da árvore muitos tipos de instrumentos “dendrômetros” são utilizados, visando fornecer informações sobre o crescimento da planta. Estes equipamentos possuem diferentes propriedades p.e. (acurácia, precisão, custo, simplicidade operacional, confiabilidade entre outras) (CLARK et al., 2000), e são divididos convencionalmente entre aqueles que mantêm contato físico com o caule p.e.

(dendrômetros de banda e eletrônicos), e aqueles que obtém medidas remotamente (dendrômetros ópticos).

Apesar da grande variedade de dendrômetros convencionais existentes, a seleção do tipo de instrumento a ser utilizado dependerá, especificamente, do resultado que se deseja alcançar. Como experimentos, em grande maioria, medem apenas a circunferência/diâmetro na parte externa do caule (*outer bark*), não fica claro quais processos foram responsáveis pela expansão e encolhimento do caule (OFFENTHALER et al., 2001), o que faz com que estes processos não sejam compreendidos com uma simples medida do diâmetro da árvore (ZWEIFEL, 2005). Baseado nas novas abordagens que surgiram com as questões das mudanças climáticas e suas implicações na dinâmica das florestas, uma nova linha de equipamentos, os “dendrômetros de ponta”, têm surgido propondo fornecer um novo conjunto de dados além da convencional medida diamétrica.

Os dendrômetros de ponta baseiam-se na instalação de sensores com sensibilidade micrométrica e resolução temporal de minutos ou segundos, existindo mais recentemente o desenvolvimento de sensores de dupla ponta, que podem ser instalados na casca e no xilema ao mesmo tempo. Esta característica refinada permite avaliar além das mudanças no crescimento radial, as relações hídricas da árvore, com enfoque na modelagem para separar as variações relacionadas ao conteúdo hídrico, que ocasionam efeitos temporários de expansão e contração do tronco, das relacionadas com crescimento real (irreversível) (ZWEIFEL et al., 2005; MENCUCINI et al., 2013; CHAN et al., 2015).

A despeito do grande número de estudos desenvolvidos com dendrômetros de banda na Amazônia (FERREIRA-FEDELE et al., 2004; VIEIRA et al., 2004; LISI et al., 2008; FIGUEIRA et al., 2011; NEPSTAD; MOUTINHO, 2013; MENDIVELSO et al., 2013), poucos são os que utilizaram os dendrômetros de ponta (RODERSTEIN et al., 2005; BRAUNING et al., 2009; HOMEIER et al., 2010), e mais raros ainda os que utilizam os de dupla ponta (VAN EMMERIK et al., 2017; BARROS, 2017, 2018). Os sítios do LBA, instrumentados para medidas da relação biosfera-atmosfera, têm sido considerados áreas potenciais para complementação da instrumentação com dendrômetros de ponta dupla. Esse é o caso, por exemplo, do sítio K34 em Manaus (VAN EMMERIK et al., 2017;

BARROS¹ et al., 2018), Bananal (TAVARES, 2015), Santarém (BARROS et al., 2018) e, no presente trabalho, na Rebio Jaru.

Além da dormência ou diminuição no tronco, outros parâmetros que indicariam resistência ou não das florestas às limitações hídricas são os chamados atributos funcionais, hipotetizados como importantes preditores de tolerância à seca (BARTLETT et al., 2012; CHOAT et al., 2012; TEODORO, 2014), isto porque as plantas apresentam uma série de estratégias de uso da água como resposta a eventos de seca (MCDOWELL et al., 2011). Os principais atributos funcionais, utilizados para acessar os processos fisiológicos que determinam a sobrevivência das plantas sob diferentes regimes de chuvas são o ponto em que plantas perdem 50% da sua condutividade (P_{50}) (CHOAT et al., 2012), o potencial hídrico na qual a espécie perde turgor (Ψ_{TLP}) (BARTLETT et al., 2012, 2014) e a regulação estomática (isohidricidade) (KONINGS; GENTINE, 2016).

O ponto de perda de turgor (Ψ_{TLP}) representa o potencial hídrico em que as células perdem turgor e as folhas murcham, fecham os estômatos, cessam a troca de gases e o crescimento (BARTLETT et al., 2014), podendo resultar em falta de carbono (*carbon starvation*). Plantas com baixo Ψ_{TLP} têm maior potencial de manter a condutância estomática, condutância hidráulica e as trocas de gases. Devido isso, esse atributo é um traço funcional diretamente relacionado com a tolerância das plantas à seca, quanto mais negativo, maior a capacidade foliar em manter suas funções fisiológicas (BARTLETT et al., 2012).

Outro traço funcional relacionado à tolerância à seca é o P_{50} , que é um indicativo do potencial hídrico em que o xilema perde 50% da sua condutividade (CHOAT et al., 2012). Este atributo está relacionado com o risco de embolia, em que bolhas de ar se formam nos vasos do xilema, bloqueando o transporte de água, e reduzindo a habilidade da planta em mover a água do solo para as folhas. A resistência ao embolismo representa, portanto, a vulnerabilidade da floresta à falha hidráulica induzida pela seca (CHOAT et al., 2012).

A regulação estomática, durante períodos de estresse hídrico, pode ajudar a impedir a falha hidráulica no xilema, reduzindo a perda de água da planta (KONINGS; GENTINE, 2016). Sob esta perspectiva, as espécies podem apresentar-se isohídricas ou anisohídricas,

¹ BARROS et al. (2018) (Comunicação pessoal)

dependendo do seu grau de regulação estomática (TARDIEU e SIMONNEAU, 1998). As espécies isohídricas, que apresentam maior capacidade de regulação estomática, são capazes de manter o potencial hídrico foliar relativamente estável sob condições de estresse. A regulação dos estômatos pode ajudar a evitar a embolia do xilema, devido à redução na perda de água por transpiração. Contudo, a captação de carbono é reduzida e essas espécies tornam-se vulneráveis à falta de carbono (*carbon starvation*) (MCDOWELL et al., 2008; KONINGS; GENTINE, 2016). Por outro lado, as anisohídricas, que substancialmente perdem potencial hídrico foliar (WEST et al., 2008; MCDOWELL et al., 2008), demonstram mínima regulação estomática (KONINGS; GENTINE, 2016), o que as possibilita manter as trocas gasosas mesmo sob condições de seca (PLAUT et al., 2012), mas elevando o risco de falha hidráulica, ou seja, de embolia do xilema. Espécies anisohídricas têm sido consideradas mais resistentes à embolia e, consequentemente, mais resistentes à seca (PLAUT et al. 2012, 2013).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O presente trabalho foi realizado em uma parcela localizada na Unidade de Conservação Federal Reserva Biológica do Jaru (Rebio Jaru). A parcela de estudo é denominada sítio RJA, e compõe um dos sítios do Programa LBA (*Large Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*), que conta com uma torre micrometeorológica localizada nas coordenadas 10° 11' 21.2712" S e 61° 52' 15.1674" W, com 62 m de altura e a uma altitude de 152,2 m (Figura 3.1). A Rebio Jaru contém uma floresta tropical sazonalmente seca, com aspecto sempre-verde predominante, presença de algumas espécies semi-decíduas e palmeiras, cuja altura média do dossel é de $20 \pm 6,7$ m, com árvores que atingem até 44 m de altura (MICHILES, 2009).

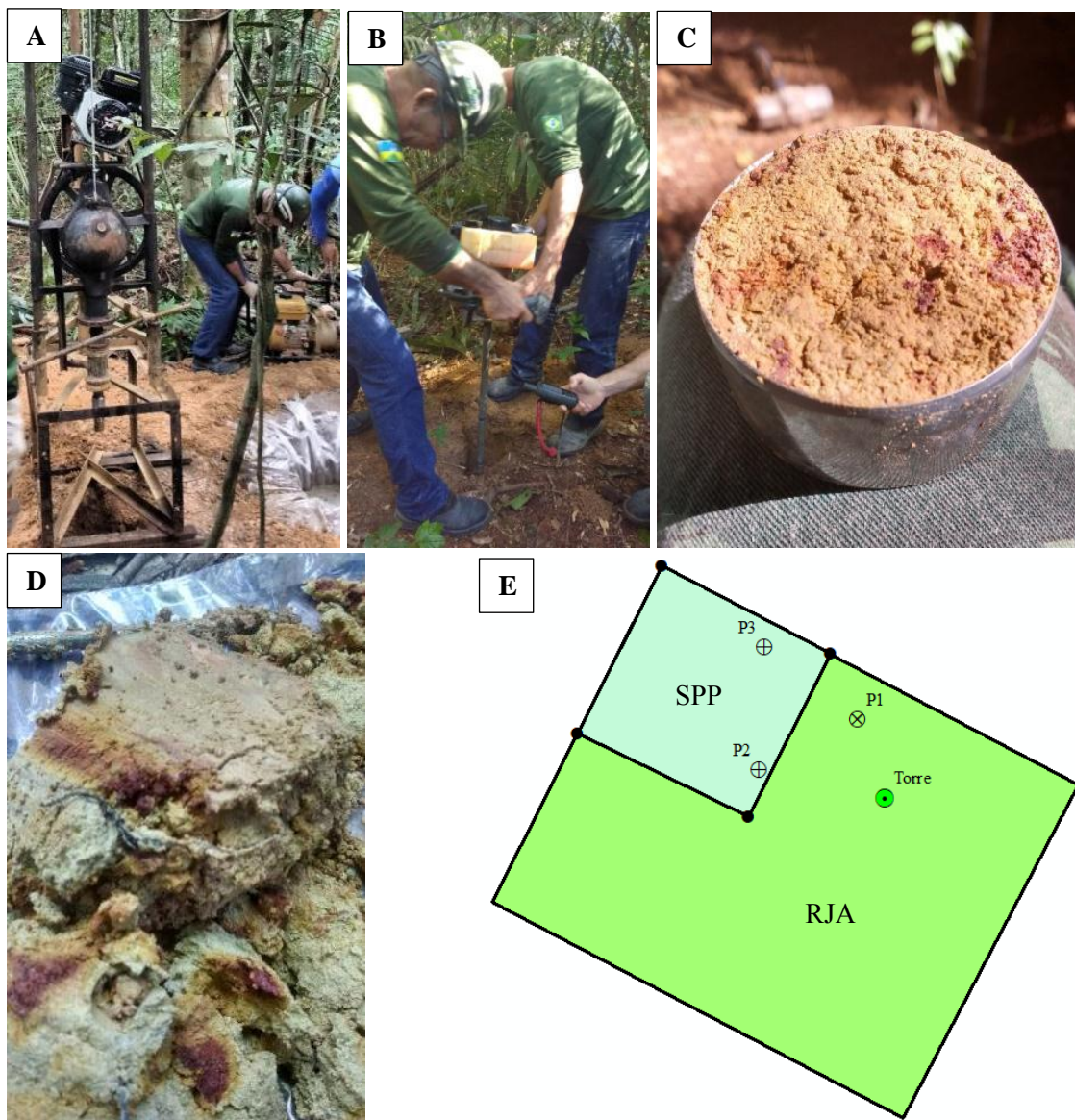
A análise dos dados obtidos na área de estudo foi trabalhada em duas escalas temporais. A primeira delas – análise interanual - teve por objetivo o entendimento da variação interanual da precipitação e índices de seca na área de estudo, baseada em dados relativos ao período de 1983 a 2015. A outra análise – análise sazonal - envolveu coleta de dados orbitais para avaliar a dinâmica do dossel (produção de folhas novas e capacidade fotossintética), e a coleta *in situ* de dados dendrométricos, ecoidrológicos (umidade do solo e profundidade do lençol freático), produção de serrapilheira, além de caracterização do solo (caracterização física e química) e da planta (parâmetros ecofisiológicos e de resistência à seca), relativos ao período de 2015 a 2017.

Na área no entorno da torre foi instalada uma parcela de 5 ha, contendo, em seu interior, uma sub-parcela permanente (SPP) de 1 ha, cuja SPP foi instalada dentro dos padrões do *Amazon Forest Inventory Network* (RAINFOR) pelo programa LBA/Rondônia. Nesta sub-parcela foram realizados estudos fitossociológicos (VENTURA², 2018) que serviram de base para a seleção das espécies vegetais a serem estudadas na presente pesquisa (Figura 3.1).

^{2 2} VENTURA et al., 2018 (Programa LBA, Comunicação pessoal, 2018)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia. As curvas de nível foram geradas com uso do *software* QGIS 2.18. A umidade do solo (CS615, *Campbell Scientific Inc.*), monitorada pelo programa LBA, tem suas medidas diárias realizadas nas profundidades de 10 cm; 20 cm; 30 cm; 40 cm; 60 cm e 100 cm. O equipamento localiza-se a 1 metro da torre de fluxo.

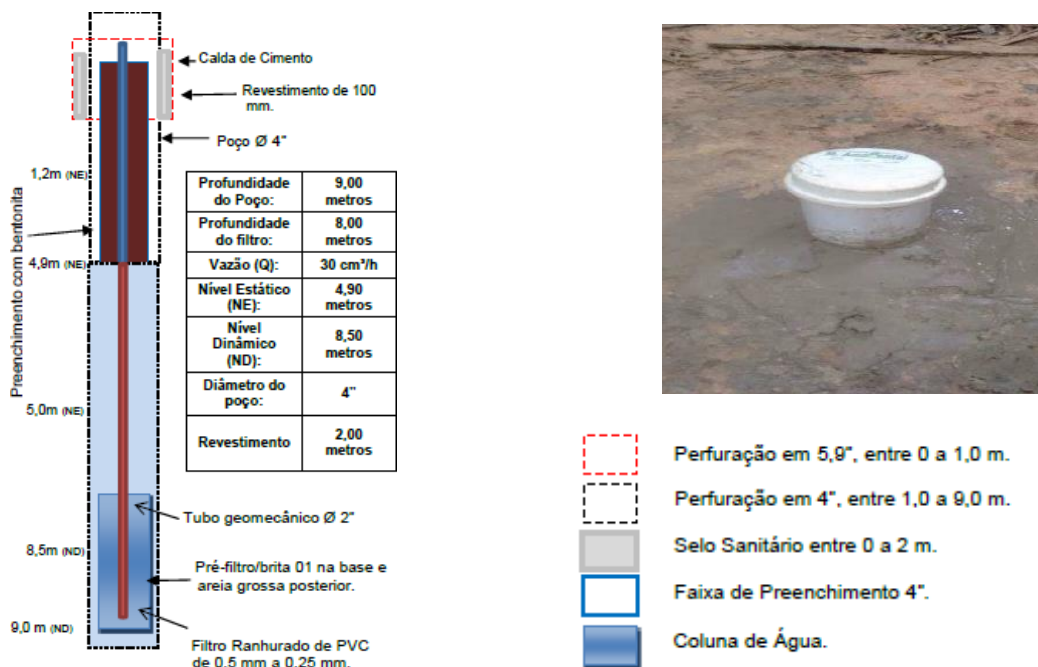
Figura 3.2 - Campanha para coleta de amostras de solo, sítio RJA. A) e B), ilustração dos equipamentos de sondagem; C), amostra indeformada; D), amostra deformada; E), localização das sondagens.



Fonte: Produção da Autora.

Para o monitoramento do lençol freático, foi instalado em 30 de abril de 2016, no âmbito do projeto GoAmazon, um piezômetro com 9 metros de profundidade no interior da parcela de estudo (10°11'10,02897"S; 61°52'21,36440"W, 157,06 m de altitude) (Figura 3.1). A instalação seguiu os procedimentos constantes nas normas da ABNT NBR 15.492 (de sondagem de reconhecimento para fins de qualidade ambiental – Procedimento), e NBR 15495-1 (de poço de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares – Parte 1: Projeto e construção) (Figura 3.3), utilizando para perfuração uma sonda a trado e sonda rotativa por circulação de água. As medidas foram realizadas mensalmente entre junho de 2016 a abril de 2018.

Figura 3.3 - Ilustração dos procedimentos de construção do piezômetro.



Fonte: Arquivo M. Ambiental (2016).

3.1.2 Variáveis climatológicas

A torre de fluxo do LBA possui equipamentos para medidas de precipitação (Pluviômetro EM ARG-100), umidade relativa do ar (termohigrômetro, HMP45D), temperatura do ar (Sensor: 107 Campbell Scientific Inc.), radiação fotossinteticamente ativa (PAR LITE, Kipp&Zonen) incidente e refletida, radiação solar (CM-21, Kipp&Zonen), temperatura do solo (STP01, Hukseflux). Devido à ocorrência de falhas nas medições de algumas variáveis, e o interesse para as análises desta pesquisa, foram usados apenas os seguintes

dados oriundos dos equipamentos instalados na torre de fluxo: umidade relativa do ar (%), temperatura do ar (°C) e radiação líquida (W.m²).

As medidas de variáveis meteorológicas são registradas em um *data logger* Campbell CR23X (*Campbell Scientific*) e armazenadas como médias de 30 minutos. A torre no sítio RJA começou a operar na sua atual localidade em janeiro de 2004, porém, no presente trabalho, utilizamos dados relativos ao período de setembro 2015 a agosto de 2017, pelo fato de se tratar do período em que foram realizadas medidas com dendrômetros e outras variáveis *in situ*, conforme explicado a seguir. Este período de estudo correspondeu a um dos episódios de seca mais severa (2015/16) registrada na Amazônia desde 1901, sob influência do fenômeno El-Niño (ERFANIAN et al., 2017; YANG et al., 2018).

3.1.2.1 Precipitação e evapotranspiração

Devido ao elevado número de falhas nos dados da torre, para análise da série histórica de precipitação foram utilizados dados da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) entre os anos de 1983 a 2017, disponível na plataforma do *International Research Institute* em grade de 0,5° x 0,5° (<http://iridl.ldeo.columbia.edu>) (CHEN, et al., 2002). Para definir os meses que caracterizam a estação seca foi utilizado o limiar de 100 mm, no qual a evapotranspiração excede a precipitação em regiões amazônicas (SOMBROEK, 2001).

A série histórica da evapotranspiração (Etp) foi avaliada com uso do produto MODIS (MOD16A2, coleção 6), de 2001 a 2017, tile h11v10, composição de 8 dias e resolução espacial de 500 m (CORRIDA et al., 2017). O algoritmo usado é baseado na equação de Penman-Monteith (LPDAAC, 2018). Os valores de Etp foram reamostrados para a escala mensal, utilizando a área ponderada dos pixels que interceptam a parcela de estudo (n=2).

3.1.2.2 Severidade da seca

O grau de severidade da seca do ano de 2015/16, na área de estudo, foi avaliado com base no *Standard Precipitation Index* (SPI), desenvolvido por Mckee (1993; 1995). O SPI é o índice que tem mostrado melhor desempenho para avaliação da variabilidade climática (GUTTMAN, 1998; KEYANTASH; DRACUP, 2004), e requer interpretação de acordo com uma escala de tempo pré-definida p.e. (1, 3, 6, 9, 12 ou 24 meses). O cálculo do SPI

necessidade uma longa série de dados de precipitação para determinar a função de distribuição de probabilidade (FDP), que é transformada em uma distribuição normal (média = 0, desvio padrão = 1). Os valores do índice são expressos em desvios, sendo que SPI positivo e negativo indicam precipitação maior e menor do que a média, respectivamente.

Nesta pesquisa, o SPI foi calculado na escala de seis meses (SPI-6), a partir dos dados de precipitação obtidos na plataforma do NOAA entre 1983-2017. Esta escala reflete um padrão de precipitação de médio prazo, e permite distinguir anomalias entre o período seco e chuvoso (LI et al., 2008), para regiões da Amazônia com forte sazonalidade na precipitação. Para definir os anos com ocorrência de seca, independente do grau, foram considerados os anos que apresentaram cinco meses ou mais com algum grau de severidade de seca. Os critérios de classificação do grau de severidade da seca estão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 3.1. Classes de severidade do *Standard Precipitation Index* (SPI).

Grau de severidade	Intervalo
Umidade extrema	$SPI > 2,0$
Umidade severa	$1,50 < SPI \leq 2,00$
Umidade moderada	$1,00 < SPI \leq 1,50$
Umidade leve	$0,50 < SPI \leq 1,00$
Normal	$-0,50 \leq SPI \leq 0,50$
Seca leve	$-0,50 < SPI \leq -1,00$
Seca moderada	$-1,00 < SPI \leq -1,50$
Seca severa	$-1,50 < SPI \leq -2,00$
Seca extrema	$SPI < -2,0$

Fonte: Adaptado de NASA (2018).

O processamento foi realizado com auxílio do *software* spi_sl_6.exe desenvolvido em linguagem C++ pelo *National Drought Mitigation Center* (NDMC) e disponibilizado na plataforma do NDMC (<http://drought.unl.edu>).

3.2 Vegetação

3.2.1 Seleção de espécies

A seleção das espécies a serem monitoradas foi baseada nos parâmetros fitossociológicos de Densidade relativa (Dr) e Índice de Valor de Importância (IVI), considerando as

espécies de interesse para Amazônia. Para isso, foram consideradas espécies com Dr e IVI com valores mais expressivos para a região de estudo com base em publicações regionais p.e. (FOTOPOULOS, 2006; AZEVEDO, 2014; DAN et al., 2015), e com base no inventário local realizado por Ventura et al. (2018) na sub-parcela permanente (SPP) instalada no entorno da torre de Fluxo LBA. Desta forma, as espécies selecionadas são caracterizadas como importantes exemplares para o estudo em questão.

Com auxílio de um parabolotânico, buscamos identificar as espécies de relevante interesse para esta pesquisa no interior da parcela de estudo (5 ha), das quais, realizou-se, também, medições do diâmetro na altura do peito ($DAP \geq 10$ cm) e altura de cada árvore. Este levantamento foi realizado em agosto de 2015, com recenseamento em abril de 2016 para identificação até o nível de espécie. Todas as árvores e marcos da parcela foram georreferenciadas com GPS Geodésico (L1L2 Topcon Hiper), com medidas tomadas a uma distância de até 15 cm do tronco, para garantir que cada ponto representasse o centro da árvore georreferenciada. Os pontos foram pós processados com a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) utilizando as estações de Porto Velho (RO), Colorado do Oeste (RO) e Ji-Paraná (RO) para triangulação. As coordenadas, altitude e erro estão apresentadas no Apêndice A.

3.2.2 Análise do dossel florestal

3.2.2.1 Serapilheira

A coleta de serapilheira foi realizada quinzenalmente, entre maio de 2016 a janeiro de 2018, visando monitorar a variação sazonal da abscisão foliar, que tem sido correlacionada com a produção de folhas novas (LOPES et al., 2016; WU et al., 2016). Para coleta de serapilheira foram instalados 4 coletores do tipo *bag* distribuídos na parcela (5 ha), construídos com tela de nylon de 2 mm, formando uma bolsa de 15 cm de profundidade para o acúmulo de serapilheira, possuindo 1,2 m de altura e área de 0,25 m² (50x50cm) (Figura 3.4). Após cada coleta, o material era conduzido para o Laboratório de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Rondônia, para secagem em estufa a 70°C por 48 horas. Após a secagem, procedia-se à pesagem em balança analítica para obtenção do peso em gramas (g) separado por folhas e miscelâneas. Os valores de serapilheira foram convertidos em Mg.ha⁻¹.

Figura 3.4 - Coletores de serapilheira e localização no sítio RJA. (A) Ilustração do coletor; (B) Localização dos coletores na parcela.



Fonte: Produção da autora

3.2.2.2 Dinâmica do dossel

Nesta pesquisa, o sítio de estudo (5 ha) foi considerado como uma região de interesse (*region of interest* - ROI) para as análises orbitais. Desta forma, as respostas obtidas *in situ* foram generalizadas para a ROI como um todo. Para avaliar importantes processos foliares que não são cobertos pelos atributos funcionais e pelas medidas dendrométricas, foram calculados dois índices de vegetação, incluindo *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (HUETE et al., 2002; Equação 3.1) e *Green chromatic coordinate* (Gcc) (RICHARDSON et al., 2007; WOEBBECKE et al., 1995; Equação 3.2).

$$EVI = \frac{2,5 * (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + 6 \times \rho_{RED} - 7.5 \times \rho_{BLUE} + 1)} \quad (3.1)$$

$$Gcc = \frac{\rho_{GREEN}}{\rho_{BLUE} + \rho_{GREEN} + \rho_{RED}} \quad (3.2)$$

Em que, ρ_{NIR} é a reflectância no infravermelho próximo; ρ_{RED} é a reflectância no vermelho; ρ_{BLUE} é a reflectância no azul; e ρ_{GREEN} é a reflectância no verde.

Os índices de vegetação foram derivados de imagens de reflectância de superfície do sensor MODIS a bordo do satélite Terra/Aqua, corrigidas com algoritmo MAIAC

(LYAPUSTIN et al., 2011a, 2011b, 2012). Foram utilizadas, no cálculo dos índices, as bandas espectrais B1, B2, B3 e B4 do sensor MODIS/MAIAC, que correspondem ao espectro eletromagnético vermelho (620-670 nm), infravermelho próximo (841-876 nm), azul (459-479 nm) e verde (545-565 nm) respectivamente. O processamento de correção atmosférica com o algoritmo MAIAC é descrito em detalhe em Lyapustin et al. (2011a; 2011b; 2012) e foi processado por Dalagnol et al. (2018). Os valores dos índices foram reamostrados para escala mensal, utilizando a área ponderada dos pixels que interceptam a parcela de estudo (n=2). Para identificar mudança nos padrões dos índices, as variações foram convertidas em Δ (Δ EVI e Δ Gcc), extraíndo a média do valor observado.

Estes índices de vegetação representam importantes dinâmicas de propriedades estruturais e bioquímicas do dossel: EVI é uma métrica utilizada como *proxy* da produtividade da floresta em termos de capacidade fotossintética de folhas maduras associadas à área foliar e GPP (HUETE et al., 2002; MAEDA et al., 2014; WU et al., 2004; LOPES et al., 2016; HILKER et al., 2017; MOURA et al., 2017; SHI et al., 2017); e Gcc é um indicador da produção de folhas novas (*leaf flush*) (LOPES et al., 2016).

3.2.3 Crescimento do tronco (Cr)

Para avaliar o crescimento radial e relacioná-lo com as condições climáticas do sítio RJA, foram instalados dendrômetros de alta resolução (ZN12-T-2IP, Natkon.ch, Suíça) a 1,5 metros acima do nível do solo em 23 indivíduos arbóreos. Com esse sensor, as mudanças de espessura na casca e no xilema são medidas por compressão ou relaxamento da mola do potenciômetro instalado nas árvores. Variações na espessura da casca e do xilema foram automaticamente registradas em intervalos de 10 minutos, para o período compreendido entre setembro de 2015 e agosto de 2017. Neste estudo, foram processados os dados da casca, dos quais extraímos medidas de crescimento e déficit hídrico.

As mudanças diurnas no diâmetro do tronco são relacionadas, principalmente, às mudanças no déficit hídrico na casca e ao status hídrico da árvore inteira (ZWEIFEL et al., 2001). Uma vez que 90% das flutuações no diâmetro são ocasionadas pelos tecidos da casca e o restante pelo xilema (ZWEIFEL et al., 2000), as medidas no diâmetro do tronco (D_c) (desconsiderando as pequenas flutuações [$< 10\%$] ocasionadas por mudanças no alburno (IRVINE; GRACE, 1997) foram usadas para gerar métricas de crescimento

da árvore. Dessa forma, admite-se que um incremento de D_c pode ser causado pelo crescimento da casca, muito mais do que pelo aumento no conteúdo de água presente nos tecidos cambiais. Por outro lado, a diminuição de D_c é causada, principalmente, pela depleção de água na árvore (ZWEIFEL et al., 2005). Dessa forma, as medidas diretas de D_c , transformadas em ΔD_c , permitem extrair o crescimento do tronco (Cr) excluindo a influência das flutuações reversíveis.

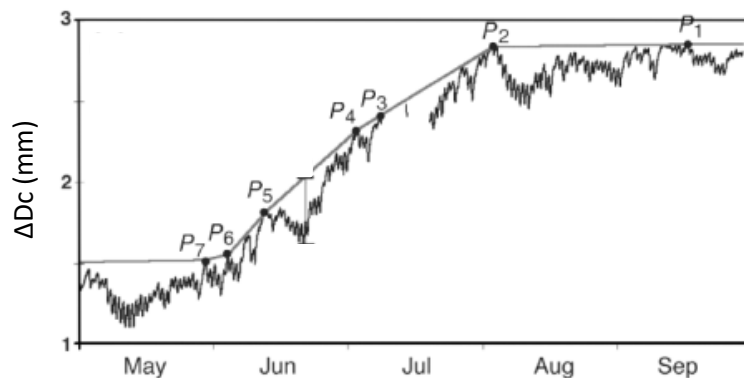
A variação de D_c foi definida pela equação adaptada de Mencuccini et al. (2013):

$$\Delta D_c = dD_c - dD_c^* \quad (3.3)$$

Em que, ΔD_c é a mudança no diâmetro da casca (μm); dD_c é a medida do diâmetro da casca ao longo do tempo (t_i); dD_c^* é o diâmetro da casca medido às 18:00 horas do primeiro dia considerado na análise.

Para gerar informações de crescimento em cada árvore, o crescimento máximo medido na casca (ΔD_c) foi admitido como irreversível. Com isso, foi gerado, para cada árvore, a “linha de crescimento (Cr)”, por meio da ligação dos valores máximos da série de dados (Figura 3.5).

Figura 3.5 - Metodologia extrair os valores de crescimento do tronco (Cr). P1 a P7 = representam os máximos de ΔD_c



Fonte: Adaptado de Zweifel et al. (2005).

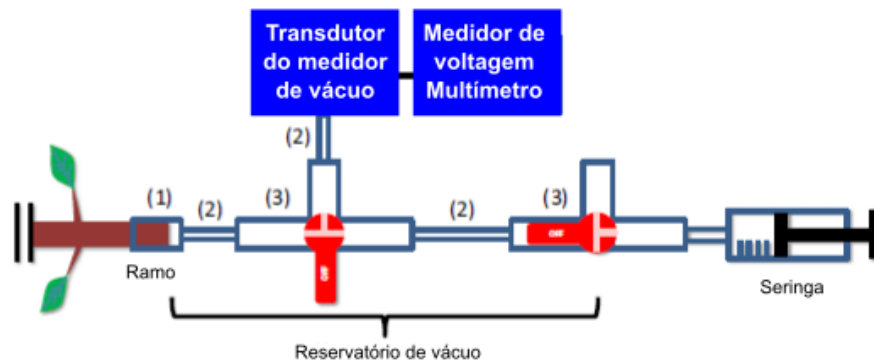
3.2.4 Atributos funcionais

Para avaliação da resistência à seca, para alguns dos indivíduos monitorados, foram avaliados os seguintes atributos funcionais: (a) potencial hídrico foliar, em que 50% da

condutividade hidráulica é perdida por causa do embolismo (P_{50}); (b) potencial hídrico foliar no ponto de perda de turgor (π_{TLP} – *water potential at turgor loss point*); (c) potencial hídrico foliar antes do amanhecer (*Predawn* – Ψ_{PD}) e ao meio dia (*Midday* – Ψ_{MD}) e (d) isohidricidade.

Para estimativa do valor de P_{50} , aplicou-se o protocolo de medida de embolismo e percentual de fluxo de saída de ar (*Percent of Air Discharge* - PAD), desenvolvido por Pereira et al. (2016). O método baseia-se na coleta de ramos das espécies selecionadas, para posterior medida da quantidade de ar existente nesses ramos, enquanto são expostos à secagem em bancada. A quantidade de ar existente na planta foi mensurada conectando um vácuo na extremidade do ramo ligado a um multímetro. Inicialmente mede-se o potencial hídrico foliar (Ψ_F), e em seguida aplica-se o vácuo para a medida de ar nos ramos. Este procedimento foi realizado até a obtenção de potenciais em torno de -8 MPa (Figura 3.6).

Figura 3.6 - Representação do esquema de medida de ar dentro dos ramos. (1) O ramo é conectado a uma tubulação de silicone; (2) mangueira com 3 mm de diâmetro interno e 5,2 mm de diâmetro externo; (3) torneira com três direções.



Fonte: Adaptado de Pereira et al. (2016).

Para obtenção do π_{TLP} foram coletadas amostras de folhas das espécies de interesse, e posteriormente levadas ao laboratório para rehidratação por 12 horas. Após rehidratadas, foram tomadas medidas pareadas de peso (g) e potencial hídrico foliar até que as folhas apresentassem progressiva desidratação e, ao final, as folhas seguiram para secagem em estufa a 70°C por 48 horas para determinar o conteúdo relativo de água. Para os cálculos e construção da curva pressão-volume, da qual se extrai o π_{TLP} , utilizou-se a planilha

desenvolvida por Sack e Pasquet-Kok (2011) e o cálculos descritos em Tyree e Hammel (1972).

Os dados de π_{TLP} e P_{50} foram comparados com estudos globais para Florestas Tropicais Sazonais baseados em Choat et al. (2012) e Bartlett et al. (2012), sendo definidas três classes de resistência à seca a partir do intervalo de confiança estabelecido por estes estudos: baixa resistência, resistência moderada e alta resistência (Tabela 3.2). Além desses atributos foi considerado ainda, o comportamento anisohídrico como indicativo de tolerância (PLAUT et al., 2012, 2013).

Tabela 3.2. Critério de definição de classes de resistência à seca.

Classe	π_{TLP} (MPa) Bartlett et al. (2012)	P_{50} (MPa) Choat et al. (2012)
Baixa resistência	$\pi_{TLP} > -1,69$	$P_{50} > -1,32$
Resistência moderada	$-1,69 \geq \pi_{TLP} \geq -3,01$	$-1,32 \geq P_{50} \geq -3,54$
Alta resistência	$\pi_{TLP} < -3,01$	$P_{50} < -3,54$

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

As medidas de Ψ_F diário foram realizadas em cinco horários: entre 06:00h e 07:00h (período com mais baixa luminosidade, *predawn*); 09:00h e 10:00h; 12:00h e 13:00h (*midday*); 14:00h e 15:00h, e 16:00h e 17:00h. Com os valores de Ψ_F foram montadas as curvas diárias para avaliação da isohidricidade das espécies, e obtidos os valores de Ψ_{PD} e Ψ_{MD} .

O potencial hídrico foliar (Ψ_F , em MPa) foi medido com uma câmara de pressão tipo *Scholander* (PMS Instruments Co., Albany, USA). Todos os traços ecofisiológicos analisados são subsidiados por medidas de Ψ_F , seguindo os diferentes protocolos. As campanhas para coleta de planta, para determinação dos atributos funcionais de dados ecofisiológicos, foram realizadas nos períodos seco, em julho de 2017 e, no período chuvoso, em outubro de 2016.

3.3 Análise dos dados

Para todas análises estatísticas foi utilizado o programa R (R Core Team 2014, version 2.12) com uso de pacotes básicos. A análise descritiva dos atributos climáticos, ecofisiológicos e orbitais também foi realizada. A fim de comparar os dados abordados nesta pesquisa de forma sazonal, o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis foi aplicado

em nível de significância de 5%, para testar a hipótese de existência de igualdade entre as amostras avaliadas.

A regressão linear simples também foi utilizada para avaliar as relações entre as diferentes variáveis, especialmente para analisar as correlações entre os fatores climáticos que direcionam a dinâmica do dossel florestal no sítio RJA, avaliada com os índices de vegetação EVI e Gcc.

4. RESULTADOS

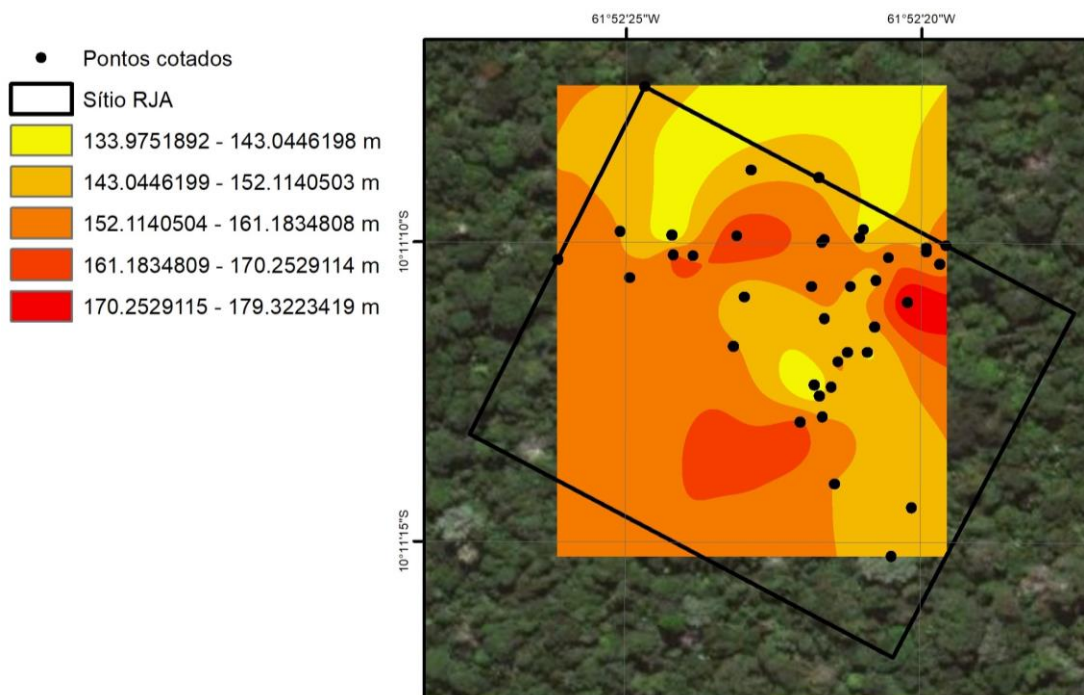
4.1 Características da área de estudo

4.1.1 Condições edáficas

Em florestas tropicais, as condições topográficas podem determinar um gradiente edáfico, alterando os padrões de drenagem e distribuição de nutrientes no solo localmente (WRIGHT, 2002). Baseado nisso, esta pesquisa buscou avaliar o perfil topográfico no sítio RJA, gerado a partir dos dados altimétricos obtidos das árvores georreferenciadas, além de parâmetros físico-químicos do solo.

A Figura 4.1 ilustra a distribuição altimétrica na área de estudo, que varia entre 134 e 179 m, com altitude média de 153 ± 7 m. Tomando como referência a torre LBA, o desnível entre a parcela e a margem do rio Machado é de 26,7 m. A parcela apresenta topografia variável, desde um relevo plano (0 – 3% de declividade) até forte ondulado (20 - 45% de declividade). A classe predominante é a ondulada (8 – 20%), uma vez que a declividade média na área de estudo foi de $15 \pm 13\%$, de acordo com a classificação da EMBRAPA (2006).

Figura 4.1 – Caracterização hipsométrica do sítio RJA.



Fonte: Produção da autora.

Em todos os perfis avaliados os solos apresentaram textura argilosa acima de 60%, e os teores de areia fina e grossa representaram, conjuntamente, entre 10 a 33% da granulometria do solo, sendo o silte a menor fração, com valores entre 2 a 10%. Em termos de fertilidade, observou-se média fertilidade de matéria orgânica ($2,01 \leq MO \leq 4,0$) até a camada de 0,20 m, de acordo com a classificação de Ribeiro et al. (1999), a partir da qual, o teor de MO apresenta baixa fertilidade até a camada de 3 m.

Os solos apresentaram condição de acidez muito alta, tanto com a análise do pH, quanto pelas medidas de saturação por alumínio e soma de bases. A camada superficial (0,20 m) apresentou as maiores concentrações dos macronutrientes P, K, Ca, Mg e Al, que diminuem com a profundidade. Em geral, na parcela de estudo a partir de 0,40 m a concentração desses nutrientes reduz abruptamente para teores baixos e até nulos, especialmente no caso do fósforo e potássio, que zeram seus teores nas camadas mais profundas do solo.

4.1.2 Fitossociologia das espécies monitoradas

No inventário florestal, realizado na sub-parcela permanente (SPP), foi identificado um total de 164 espécies distribuídas em 40 famílias e 108 gêneros, totalizando 506 indivíduos de árvores por hectare, que representam uma área basal de $24,97 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ (VENTURA, 2018). A densidade relativa das famílias das espécies selecionadas para esta pesquisa corresponde a: Anacardiaceae 1,2%, Burseraceae 4,2%, Chrysobalanaceae 1,98%, Euphorbiaceae 14,2%, Fabaceae 21,8%, Lecythidaceae 3%, Malvaceae 5,9%, Myristicaceae 3,6%, Olacaceae 4,2% e Sapotaceae 4,6%, totalizando 64,68% da densidade total da sub-parcela permanente (VENTURA, 2018). Fabaceae é a família botânica mais representativa na Reserva Biológica do Jaru com base nos inventários realizados nesta reserva (AZEVEDO, 2014; VENTURA, 2018), e é também, a família mais representativa em outras regiões Amazônicas (FOTOPOULOS, 2006; AZEVEDO, 2014; ANDRADE et al., 2015; DAN et al., 2015; ANDRADE et al., 2017).

Com base na densidade relativa e valor de importância das espécies inventariadas na sub-parcela permanente, e em outros estudos regionais, foram selecionadas 31 indivíduos de 23 espécies, dos quais foram tomadas medidas de crescimento do tronco de 23 indivíduos de 19 espécies, também as características funcionais de 22 indivíduos de 18 espécies para

análise de π_{TLP} , e P_{50} analisado entre 10 indivíduos de 10 espécies, presentes na parcela de 5 ha do presente estudo.

Devido estes aspectos, foi priorizada a seleção das espécies descritas na Tabela 4.1, procurando selecionar indivíduos de considerável Dr e IVI evidenciados na sub-parcela e, em outras áreas de estudo no âmbito amazônico, e no âmbito do projeto GoAmazon. Estas espécies apresentam hábito foliar sempre-verde (n=26), com algumas espécies de hábito semidecíduo (n=5). A dominância de dossel (DD) é predominante (n=17) entre os indivíduos selecionados.

A área basal das espécies selecionadas na parcela (5 ha) deste estudo é de 31,25 m². Quanto ao hábito foliar as espécies sempre-verde representam 28,95% da densidade relativa para a região de estudo e as semidecíduas 7,1% (AZEVEDO, 2014; VENTURA, 2018).

Tabela 4.1 - Características das espécies selecionadas para o estudo e critério de seleção. Dr=densidade relativa (%); IVI=índice de valor de importância (%); G = área basal (m²) (medidas realizadas por esta pesquisa); DD=dossel dominante; SB=sub-bosque; SV = sempre-verde; SD = semidecídua.

ID	Espécies	Família	Hábito foliar	Dr	G	IVI
36	<i>Astronium lecointei</i> Ducke (DD)	Anacardiaceae	SV	0,79	1,28	1,11 ¹
254	<i>Astronium lecointei</i> Ducke (DD)		SV		1,35	
152	<i>Protium tenuifolium</i> (Engl.) Engl. (DD)	Burseraceae	SV	0,23 ¹	1,30	0,22 ¹
151	<i>Protium nitidifolium</i> (Cuatrec.) Daly (DD)		SV	0,20	0,75	0,52 ¹
168	<i>Tetragastris altissima</i> (Aubl.) Swartz (SB)		SV	1,04 ¹	1,25	2,69 ¹
288	<i>Licania hypoleuca</i> Benth. (SB)		SV	0,40	0,37	0,32
498	<i>Licania sprucei</i> (Hook.f.) Fritsch (DD)	Chrysobalanaceae	SV	0,40	1,05	0,33
284	<i>Licania sprucei</i> (Hook.f.) Fritsch (SB)				0,52	
382	<i>Anamalocalyx uleanus</i> (Pax & K.Hoffm.) Ducke (SB)	Euphorbiaceae	SV	12,9	0,43	4,35 ¹
380	<i>Sagotia brachysepala</i> (Mull. Arg.) R. Secco (SB)		SV	0,01 ³	0,52	0,01 ³
379	<i>Sagotia brachysepala</i> (Mull. Arg.) R. Secco (SB)					
147	<i>Copaifera multijuga</i> Hayne (DD)	Fabaceae	SV	2,96	1,86	3,78 ¹
31	<i>Copaifera multijuga</i> Hayne (DD)		SV		0,85	
24	<i>Dialium guianense</i> (Aublet.) Sandwith (DD)		SV	1,19	1,66	5,03 ¹
328	<i>Dipteryx magnifica</i> Ducke (DD)		SD	0,20	1,62	0,41
183	<i>Dipteryx odorata</i> (Aublet) Willd. (DD)		SD	2,15 ¹	0,97	6,45 ¹
20	<i>Macrobium suaveolens</i> Benth (DD)		SD	4,35	1,76	0,10 ¹
29	<i>Tachigali chrysophylla</i> (Poepp.) Zarucchi & Herend. (DD)		SV	3,36	0,67	2,76
177	<i>Tachigali chrysophylla</i> (Poepp.) Zarucchi & Herend. (DD)		SV		0,64	
180	<i>Tachigali chrysophylla</i> (Poepp.) Zarucchi & Herend. (DD)		SV		1,58	

continua

Tabela 4.1 – Conclusão.

ID	Espécies	Família	Hábito foliar	Dr	G	IVI
102	<i>Swartzia ingifolia</i> Ducke (DD)		SD	0,20 ²	1,53	0,16 ²
144	<i>Sterculia duckei</i> E.L. Taylor ex J.A.C. Silva&M.F.Silva (DD)		SD	0,20	1,24	0,29
182	<i>Lueheopsis rosea</i> (Ducke) Burret (SB)	Malvaceae	SV	0,14	0,65	0,92
286	<i>Cariniana decandra</i> Ducke (SB)	Lecythidaceae	SV	0,59	1,13	5,22 ¹
161	<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori (DD)			0,20	0,94	0,24
381	<i>Virola michelii</i> Heckel (SB)	Myristicaceae	SV	1,38	0,41	1,08
27	<i>Minquartia guianensis</i> Aubl. (SB)	Olacaceae	SV	1,58	1,17	2,06
167	<i>Minquartia guianensis</i> Aubl. (SB)				1,10	
03	<i>Minquartia guianensis</i> Aubl. (SB)				1,12	
137	<i>Pouteria egleri</i> Eyma (SB)	Sapotaceae	SV	1,00 ²	0,65	1,17 ²
32	<i>Pouteria durlandii</i> (Standl.) Baehni (SB)		SV	0,58 ¹	0,88	0,45
Total (n = 31)				36,05	31,25	39,67

Fonte: Produção da autora, baseado em Ventura (2018).

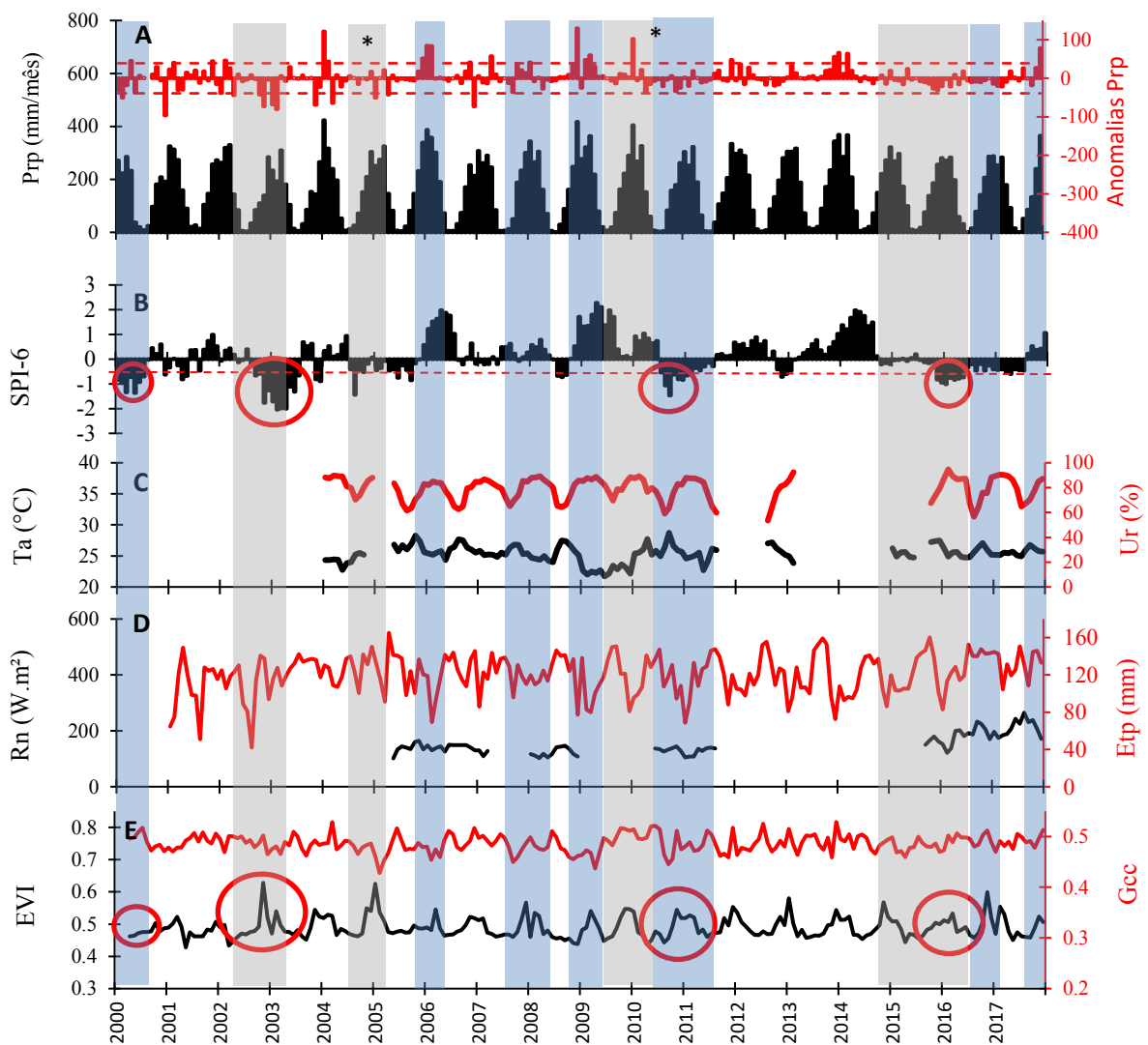
Nota: ¹Azevedo (2014); ²considerou-se o gênero como de importância baseado em Ventura (2018) e ³Dan et al. (2015).

O arranjo espacial das árvores na sub-parcela, apresentou distribuição aleatória (VENTURA, 2018). Esta característica de dispersão da estrutura de uma comunidade vegetal dá evidências de que a área de estudo caracteriza-se como um ambiente não seletivo, como visto nas condições edáficas, que apresentaram homogeneidade nos parâmetros físico-químicos do solo, e no relevo.

4.2 Padrões Interanuais e sazonais das condicionantes climáticas e correlações com EVI, Gcc e Etp

Os padrões temporais (série histórica de longo prazo) das variáveis climáticas (precipitação e respectivas anomalias, temperatura e umidade do ar, e radiação líquida), índice de seca (SPI-6), índices de vegetação pelo MODIS/MAIAC (EVI e Gcc) e evapotranspiração (MOD16A2) estão apresentados na Figura 4.2.

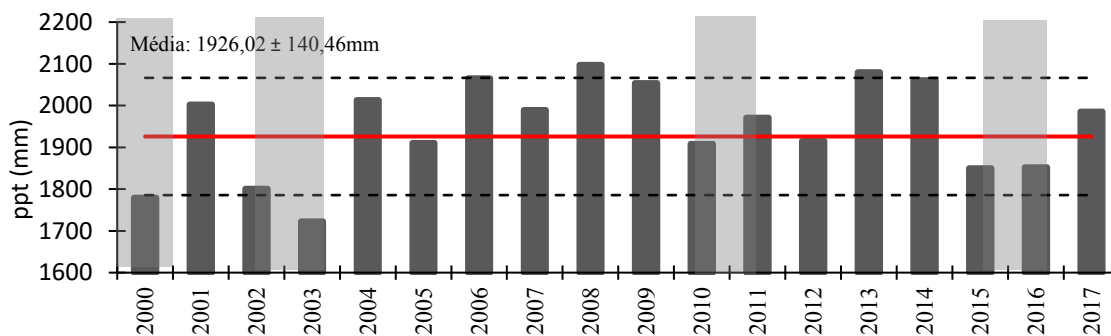
Figura 4.2 - Série temporal de variáveis climatológicas e índices de vegetação, sítio RJ. (A) Precipitação (Prp) e anomalias de precipitação (2000/17); (B) SPI-6 (2000/17); (C) Temperatura do ar (Ta) (2004/17) e Umidade do ar (Ur) (2004/17); (D) Evapotranspiração (Etp) (MOD16A2, 2001/17) e radiação líquida (Rn) (2005/17); (E) Índices EVI e Gcc (MODIS/MAIAC). Box em cinza = meses de El-Niño; Box em azul = meses de La-Niña; * = anomalias positivas no oceano Atlântico Norte.



Fonte: Produção da autora.

A análise dos dados de precipitação do sítio RJA, estimados pelo NOAA (Figuras 4.2a e 4.3), não indica variação interanual expressiva das chuvas ao longo do período de estudo (2000 a 2017). O menor índice anual de chuva foi registrado em 2003 (1.723 mm), e coincidiu com um episódio de El-Niño. O maior índice anual (2.097 mm), foi registrado em 2008, sob condições de La-Niña. Destaca-se que, 2013 (2.080 mm) e 2014 (2.061 mm) foram anos chuvosos, mas nenhuma anomalia de TSM foi detectada nesses anos. A média anual para o período foi de 1.926 ± 141 mm, exibindo uma diferença máxima de 11% entre a média anual e o ano menos chuvoso (2003).

Figura 4.3 - Precipitação anual total (ppt) para o sítio RJA. Box em cinza = anos com ocorrência de seca no sítio RJA; Linha vermelha representa a média anual, baseado na série histórica (1983-2015); Linha tracejada representa o desvio padrão da série.



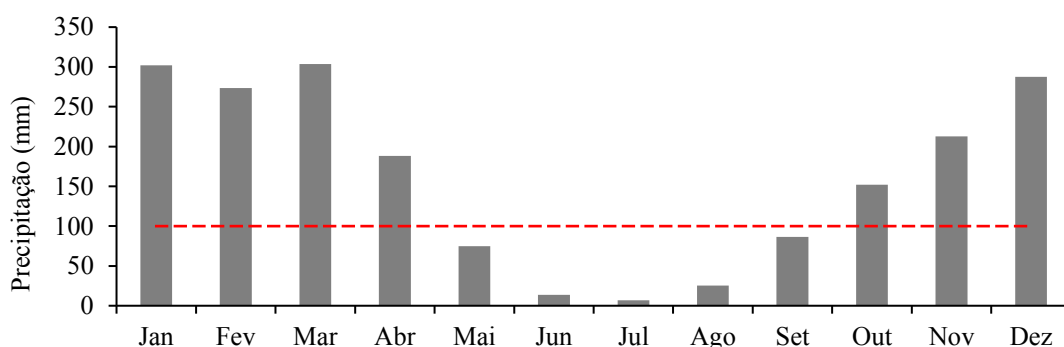
Fonte: Produção da autora.

As anomalias de precipitação mostraram fortes valores negativos no ano de 2003 em 58% dos meses, dos quais 43% apresentaram anomalias abaixo de um desvio padrão (< -1 sd), durante os períodos seco e chuvoso (Figura 4.2). Os anos seguintes, 2004 e 2005 também foram marcados por meses com anomalias negativas de chuva (< -1 sd), porém em menor intensidade que o ano de 2003. Nos anos de 2010 e 2011, anomalias negativas de precipitação foram observadas em 63% dos meses. Nos anos de 2015 e 2016, as anomalias negativas foram observadas em 20 meses, ou seja, 83% do tempo. Os dados aqui apresentados indicam que o padrão de anomalias negativas iniciado nos anos de 2015 e 2016 persistiu até 2017, perfazendo mais 7 meses (58%) com anomalias negativas em 2017. Para a área de estudo, entre 2015 e 2017 a redução das chuvas não foi marcada por anomalias extremas em intensidade, mas, o destaque para esse período foi a persistência das anomalias negativas.

Esses dados nos dão um indício de que a chuva da área de estudo parece ser afetada por outros processos além do ENSO ou AMO. De acordo com Khanna et al. (2017), a grande fragmentação florestal em Rondônia, decorrente do desmatamento, alterou o regime hidroclimático desta região, passando de um mecanismo termodinâmico para um mecanismo dinâmico. Segundo os referidos autores, essa mudança provocou aumento de 25% nas chuvas no noroeste do estado, e 25% de redução na porção sul. Erfanian et al. (2017) também evidenciaram que o forte evento de seca sobre a Amazônia em 2015/16 não pôde ser explicado apenas pela oscilação na TSM do Pacífico e Atlântico, e sugerem a contribuição de fatores não oceânicos, como mudança na cobertura do solo e aquecimento induzido pelo CO₂.

De acordo com a série climatológica para o período de 1983 a 2015, observa-se que a estação seca no sítio de estudo tem duração média de 5 meses (DSL – *dry season length*), estendendo-se, em geral, de maio a setembro (Figura 4.4) Em função desse prolongado período de seca, o sítio de estudo é caracterizado como um dos mais sazonais dentre os sítios com torre micrometeorológica monitorados pelo LBA pe. (RESTREPO-COUBE et al., 2013, 2016). Outros sítios do programa LBA com prolongada estação seca seriam Tapajós, Caxiuanã e Bananal (DA ROCHA et al., 2009).

Figura 4.4 - Precipitação média mensal climatológica, sítio RJA. Com base nos dados do NOAA entre 1983 e 2015. Linha vermelha representa o limiar abaixo do qual se considera estação seca ($Prp \leq 100\text{mm}$).



Fonte: Produção da autora.

Para o período de realização das medidas *in situ* do presente estudo (2015/17), a estação chuvosa de 2015/16 (outubro a abril) apresentou redução de 107 mm em relação à média de longo prazo para o mesmo período (246 ± 61 mm). Essas anomalias negativas

prolongaram-se até a estação chuvosa seguinte (2016/17), para a qual observou-se diminuição de 82 mm na precipitação (Figura 4.2a). Na estação seca de 2016 (maio a setembro), a precipitação apresentou redução total de 22 mm de chuvas, enquanto em 2017 observou-se um aumento de 39 mm para o mesmo período. Depreende-se que o quadro anômalo nas chuvas sobre o sítio RJA iniciado em 2015 só cessou em 2017. Ou seja, ao longo dos 26 meses de estudo, 19 (79%) apresentaram anomalia negativa de precipitação.

A severidade das secas sobre a região de estudo foi também caracterizada por meio do SPI-6. A partir deste índice, foram registrados, na área de estudo, episódios de seca nos anos 2000 (SPI = $-0,98 \pm 0,27$), 2002/03 (SPI = $-1,38 \pm 0,56$), 2010/11 (SPI = $-0,82 \pm 0,31$) e 2015/16 (SPI = $-0,85 \pm 0,10$) (Figura 4.2b). De acordo com a classificação do SPI, a seca que ocorreu em 2002/03 foi a que apresentou maior grau de severidade (moderado), com duração de 11 meses (setembro de 2002 a julho de 2003) e uma redução de 242 mm nas chuvas nesse período. Os episódios de seca em 2000, 2010/11 e 2015/16 apresentaram grau leve, com redução de 85 mm, 98 mm e 108 mm, respectivamente. Este resultado corrobora os obtidos por Muler et al. (2018), que identificaram 2003 como o ano de seca hidrológica mais severa para o estado de Rondônia.

É importante mencionar que o ano de 2015/16 foi marcado pela ocorrência de um dos eventos de El-Niño mais severos reportados na Amazônia nas últimas décadas, produzindo diminuição das chuvas e aumento de temperatura em várias regiões do bioma (ERFANIAN et al., 2017; CPC, 2018). Durante esse evento, foi registrada redução média de 400 mm (16,5%) na precipitação, entre os meses de agosto de 2015 e julho de 2016 (YANG et al., 2018) sobre a bacia amazônica. No sítio RJA, o episódio de seca de 2015/16 foi identificado entre os meses de novembro de 2015 e maio de 2016, os quais apresentaram redução de 7% nas chuvas. Esse resultado corrobora os obtidos pelo SPI-6, que indicou seca leve durante o episódio de El-Niño na área de estudo. No entanto, embora não tenha sido caracterizada como extrema, conforme exposto anteriormente, os dados aqui analisados evidenciaram um prolongado período com anomalias negativas de chuva.

A temperatura do ar apresentou amplitude de 7°C no período de 2004 a 2017. O padrão sazonal da temperatura do ar é de aumento na estação seca e diminuição na chuvosa. Os

anos 2005 (26,7 °C), 2006 (26 °C), 2010 (26,2 °C), 2012 (26,2 °C), e 2015 (26 °C), apresentaram maior média anual, coincidindo com alguns episódios de El-Niño, La-Niña e AMO (Figura 4.2c). Os resultados aqui apresentados indicam uma leve tendência de aumento da temperatura para o período analisado, ou seja, de 0,15° C em 13 anos, com os maiores valores de temperatura registrados nas estações chuvosas de 2015/16 (27,5 °C em dezembro de 2015) e de 2016/17 (27,1 °C em outubro de 2016), e na estação seca de 2017 (26,8 °C em setembro de 2017). Durante o período de El-Niño identificado para a área de estudo (novembro de 2015 a maio de 2016), foi registrado aumento médio de $1,3 \pm 1,1$ °C na temperatura do ar comparada à média de longo prazo. Estudos anteriores abordaram um aumento médio de 0,7 °C na temperatura sobre a Amazônia durante o El-Niño de 2015/16 (YANG et al., 2018).

Como esperado, e em um padrão contrário ao da temperatura, a umidade relativa do ar apresentou uma tendência de diminuição em torno de 1,19% em 13 anos. Sazonalmente os maiores valores são observados na estação chuvosa ($84 \pm 6\%$) e os menores na estação seca ($72 \pm 9\%$). No período de 2015/17, a umidade relativa do ar foi menor na estação chuvosa de 2015/16 ($83 \pm 7\%$), sob efeito de seca de El-Niño, em comparação com 2016/17 ($86 \pm 9\%$). Na estação seca de 2016 foi observada média de $73 \pm 14\%$, e em 2017 de $74 \pm 9\%$ (Figura 4.2c). O período que compreendeu a seca de El-Niño sobre o sítio de estudo, apresentou redução média de $0,19 \pm 5,5\%$ na umidade relativa do ar.

A radiação líquida (Rn), medida pela torre, apresentou um grande intervalo de ausência de dados, ao longo dos anos de 2005 a 2017. No entanto, os poucos dados registrados indicam um expressivo aumento nos anos 2015, 2016 e 2017 (médias anuais de 164 ± 12 W.m⁻², 184 ± 34 W.m⁻² e 211 ± 30 W.m⁻², respectivamente). Sazonalmente, o padrão é de aumento na estação seca (média 139 ± 11 W.m⁻²) e diminuição na estação chuvosa ($111,97 \pm 19,45$ W.m⁻²) ($p = 0,03$), representando um aumento de 24% no saldo de radiação da estação seca em comparação com a chuvosa (Figura 4.2d). O incremento da Rn durante a estação seca foi apontado por diversos estudos conduzidos na Amazônia baseados em torres de fluxo p.e. (ROCHA et al., 2004; VON RANDOW et al., 2004; ANDRADE et al., 2009). Este padrão está relacionado à menor cobertura de nuvens e maior incidência da radiação solar (MALHI et al., 2002; ROCHA et al., 2004). No período 2015/17, a Rn apresentou média de 199 ± 21 W.m⁻² na estação seca de 2016 e

média de $240 \pm 22 \text{ W.m}^{-2}$ em 2017. Já na estação chuvosa de 2015/16 Rn teve média de $163 \pm 24 \text{ W.m}^{-2}$ e em 2016/17 de $192 \pm 19 \text{ W.m}^{-2}$ (Figura 4.2d). Durante o período em que o sítio RJA foi afetado pela seca de El-Niño (nov. 2015 a maio 2016), a Rn apresentou aumento médio de $52 \pm 14 \text{ W.m}^{-2}$ em relação à média de longo prazo para o mesmo período.

Sob o aspecto da fenologia do dossel florestal, o EVI mostrou padrão sazonal estatisticamente significativo ($p = 0,004$), com média de $0,47 \pm 0,001$ no período seco e $0,51 \pm 0,02$ no período chuvoso (Figura 4.5e). Esse padrão de redução no índice na estação seca indica a ocorrência do efeito *browning* e sugere uma correlação maior do EVI com a chuva ($R^2 = 0,37$, $p < 0,001$) do que com a Rn ($R^2 = 0,13$, $p = 0,06$) no período de estudo (2015/17), enquanto uma correlação com a média mensal climatológica os valores sobem para $0,74$ ($p < 0,001$) e $0,44$ ($p = 0,02$), para precipitação e Rn, respectivamente. Esses resultados demonstram que, em geral, a disponibilidade de água seria um fator mais limitante que a radiação líquida para a atividade fotossintética da floresta nesse sítio.

No ano 2000, cujo episódio de seca predominou na estação chuvosa e em meados da estação seca (janeiro a julho), foi observada uma redução de 4% no EVI em relação à média de 16 anos (2000-2015) para o mesmo período. Para os meses chuvosos (janeiro a abril) a redução foi de 2%, porém, nos meses secos houve um aumento de 0,7%. Já no evento de seca em 2002/03, que predominou durante a estação chuvosa e meados da estação seca (setembro de 2002 a julho de 2003), observou-se aumento de 2% no EVI em comparação com a média dos mesmos meses. Neste episódio os meses chuvosos (outubro a abril) registraram aumento de 2% no EVI, com registro de um aumento de 1,5% nos meses secos (maio a julho). Em 2010/11, cuja seca afetou os meses de julho de 2010 a janeiro de 2011, correspondentes à meados da estação seca e meados da chuvosa, não foi observada alteração nos valores médios do EVI durante esses meses, em comparação com a média histórica. Já durante o evento de seca em 2015/16, predominante entre os meses de novembro de 2015 a maio de 2016, os quais abrangem a estação chuvosa (exceto maio), o EVI mostrou declínio de 0,72%, seguido de um aumento de 1,4% na estação seca. Dessa forma, durante os episódios de seca sobre o sítio RJA, não foi observada

mudança consistente do EVI na estação chuvosa (alguns anos registraram aumento e outros diminuição) (Figura 4.2e).

Yang et al. (2018) analisaram o efeito do El-Niño de 2015/16 na dinâmica do dossel amazônico com uso de dados MODIS/MAIAC, e registraram um suave aumento médio de 0,0001 unid. no EVI sobre florestas tropicais amazônicas, e observaram que 55,4% da bacia apresentou *greenning* e 45,6% *browning*, com *greenning* predominando na porção norte-central e sul do bioma. A partir dos dados aqui apresentados, observa-se que durante este evento de El-Niño predominou uma redução no EVI no sítio RJA, com 57% dos meses apresentando ΔEVI negativo na estação chuvosa e 29% na estação seca.

Em relação à renovação foliar, o Gcc não apresentou sazonalidade estatisticamente significativa ($p = 0,22$), sendo observada média de $0,48 \pm 0,01$ na estação chuvosa, e de $0,49 \pm 0,01$ na estação seca (Figura 4.5f). Durante o episódio de seca em 2000, foi observado um aumento de 4% em comparação com a média histórica (2000/17) do mesmo período. A estação chuvosa teve aumento de 3% e a estação seca de 2%. Na seca de 2002/03 o Gcc apresentou redução de 0,11%, afetando a estação chuvosa com uma redução de 0,4%, e os meses secos registraram declínio de 0,2% no Gcc. Em 2010/11, o Gcc apresentou redução de 1,4% durante os meses com ocorrência de seca, sendo esta redução na estação seca na ordem de 2,6%, enquanto na chuvosa houve um aumento de 0,3%. No episódio de seca mais recente registrado sobre o sítio de estudo, em 2015/16, o Gcc registrou aumento de 1%. Como visto anteriormente, esta seca predominou na estação chuvosa, na qual 50% dos meses apresentaram ΔGcc negativo, e após cessar seus efeitos e persistirem as anomalias de chuva sobre a região, o Gcc também apresentou aumento de 0,3% na estação seca, com 60% dos meses em que se registrou ΔGcc negativo. Assim como o EVI, o Gcc também não apresentou um comportamento padronizado durante os eventos de seca. A sazonalidade na produção de folhas novas, com uso do Gcc como *proxy*, não apresentou correlação significativa com nenhuma variável climática. Contudo, observando a tendência dessas relações, o Gcc tende a aumentar quando a precipitação diminui (Figura 4.2a, 4.2e).

Na ausência de dados de evapotranspiração da torre, foi realizada uma análise com o produto Etp do sensor MODIS (MOD16A2). A Etp apresentou variação sazonal com uma amplitude muito pequena (14 mm) entre a estação seca e chuvosa, com os maiores valores

ocorrendo na estação seca (127 ± 7 mm) comparada à estação chuvosa (113 ± 14 mm), e uma tendência de aumento anual de cerca de 0,87 mm (Figura 4.2d). Mas, esta sazonalidade não apresentou significância estatística ($p = 0,18$). No período 2002/03, a Etp apresentou aumento de 5% em relação à média histórica para o mesmo período, sendo registrado maior aumento durante os meses da estação chuvosa (7%) em comparação com os meses da estação seca (5%). Em 2010/11, foi registrada uma redução na Etp em torno de 9%, em que os meses da estação chuvosa (out. a jan.) apresentaram maior redução (13%) em comparação aos meses da estação seca (jul. a set.) (4,5%). Durante o episódio de seca de 2015/16, a Etp apresentou aumento de 3%, com registro de aumento de 5% na estação seca seguinte (após El-Niño). Embora, não tenha sido observado um padrão claro na variação da Etp durante as secas na região, uma resposta de aumento durante esses eventos foi mais frequente p.e. (em 2002/03 e 2015/16).

O padrão de aumento da evapotranspiração em regiões amazônicas, durante a estação seca, foi apontado por vários autores p.e. (SHUTTLEWORTH et al., 1988; DA ROCHA et al., 2009), inclusive na Rebio Jaru, com base nos dados da torre de fluxo (VON RANDOW et al., 2004; DA ROCHA et al., 2009; ANDRADE et al., 2009). Por outro lado, Restrepo-Coupe et al. (2013) reportaram uma diminuição da Etp na estação seca nesse sítio. Os dados do MODIS apontam para uma tendência de aumento da Etp na estação seca, porém, de acordo com os dados *in situ* baseado em Von Randow et al. (2004), a correlação entre Etp da torre e Etp do MODIS, para o período de janeiro a dezembro de 2004, foi somente de 0,27 ($p = 0,124$).

4.3 Medidas *in situ* e medidas SR

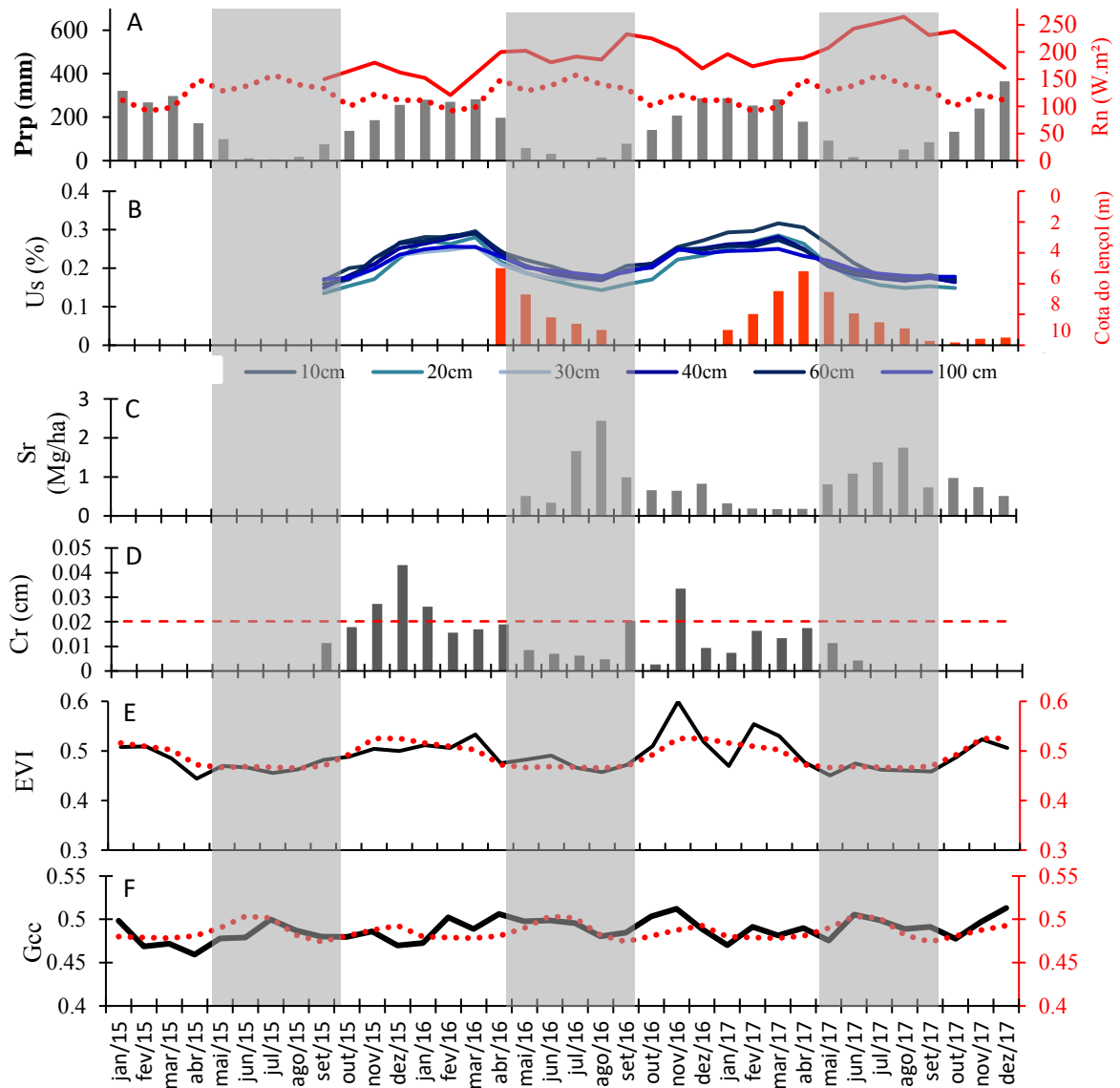
Os processos sazonais e interanuais passíveis de ocorrer no sítio RJA são investigados nesse item por meio da análise conjunta das variáveis obtidas *in situ* (precipitação³, radiação líquida, serapilheira, umidade e propriedades do solo, crescimento do tronco e tolerância das plantas à seca), entre 2015 e 2017, em comparação com as medidas obtidas remotamente (EVI, Gcc e Etp).

³ NOAA

4.3.1 Variação temporal das medidas *in situ*

A Figura 4.5 ilustra a variação temporal da precipitação, radiação líquida, umidade do solo, lençol freático, serapilheira, crescimento do tronco e índices de vegetação (EVI e Gcc), evidenciando, quando possível, os padrões históricos das variáveis e suas medidas ao longo da série deste estudo (2015/17).

Figura 4.5 - Padrão temporal de variáveis climatológicas para a série de estudo (2015-2017), sítio RJA. Box cinza = período seco; Linhas pontilhadas representam a média climatológica das variáveis; Prp = precipitação; Rn = radiação líquida; Us = umidade do solo; Sr = serapilheira; Cr = crescimento do tronco.



Fonte: Produção da autora.

A umidade do solo (Us) apresentou sazonalidade, com aumento na estação chuvosa e diminuição na estação seca (Figura 4.5b). No período chuvoso 2015/16 a umidade do solo apresentou média de $0,24 \pm 0,04\%$, em 2016/17 os valores foram de $0,25 \pm 0,03\%$. Na estação seca de 2016 o valor médio de umidade do solo foi de $0,19 \pm 0,01\%$ e em 2017 foi de $0,19 \pm 0,02\%$. A Us apresenta sazonalidade síncrona com a precipitação ($R^2 = 0,77$, $p < 0,0001$), ou seja, quando as chuvas reduzem a Us também diminui. Uma correlação inversa foi observada com Etp ($R^2 = 0,46$, $p < 0,001$) e radiação líquida ($R^2 = 0,26$, $p = 0,008$), sustentando a hipótese de que a floresta suporta a seca sazonal, mantendo alguns processos ativos, quando a água não é um fator limitante.

O lençol freático foi monitorado entre abril de 2016 e dezembro de 2017. O pico da cota do lençol ocorre no mês de abril, coincidindo com o final do período chuvoso, momento no qual encontra-se no máximo de recarga (Figura 4.5b). Durante todo período seco, o lençol reduz gradativamente sua profundidade, chegando ao mínimo entre os meses de setembro e outubro, acompanhando a sazonalidade da precipitação e umidade do solo. A correlação entre lençol freático e precipitação foi significativa ($R^2=0,78$, $p<0,001$) com atraso de 3 meses. Esta defasagem demonstra que a chuva da estação chuvosa, entre 2 a 3 meses, é crucial para a recarga do lençol durante o período seco. A identificação de anomalias negativas de precipitação nos meses de fevereiro, março e abril, pode ser um indicador de condições extremas para sobrevivência das espécies. Dessa forma, anomalias negativas na estação seca não provocam situação extrema para a floresta quanto provocariam a redução das chuvas na estação chuvosa, ou um eventual prolongamento da estação seca.

A produção total de serapilheira (folhas e miscelâneas) no sítio RJA, ocorreu o ano inteiro, mas tendeu a apresentar maior produtividade durante o período seco (Figura 4.5c). A produção na estação seca de 2016 foi de $9,13 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, cuja estação compreende o período após a seca de El-Niño, mas com persistente anomalia negativa de chuva. Já na estação seca de 2017, em que foi evidenciado normalidade no padrão de chuvas na região, a produção de serapilheira foi de $7,94 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, representando uma diminuição de 13% de um ano para outro. No período chuvoso de 2016/17 a produção de serapilheira total foi de $5,91 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. A fração folha apresentou maior contribuição que a fração miscelânea na produção total de serapilheira, com valor máximo em agosto de 2016 ($2,44 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$),

e mínimo em março e abril de 2017 (0,18 Mg.ha⁻¹) (Tabela 4.2). A contribuição total de serapilheira foliar no período seco de 2016 e 2017 foi de 5,94 Mg.ha⁻¹ e 5,74 Mg.ha⁻¹ respectivamente.

Tabela 4.2 - Fração de serapilheira, sítio RJA. Células cinzas representam período seco.

Data	Folha		Miscelânea		TOTAL
	Mg.ha ⁻¹	%	Mg.ha ⁻¹	%	Mg.ha ⁻¹
mai/16	0.51	63.00	0.30	37.00	0.81
jun/16	0.34	87.18	0.05	12.82	0.39
jul/16	1.66	66.67	0.83	33.33	2.49
ago/16	2.44	69.52	1.07	30.48	3.51
set/16	0.99	51.30	0.94	48.70	1.93
out/16	0.66	48.89	0.69	51.11	1.35
nov/16	0.65	50.31	0.64	49.69	1.29
dez/16	0.82	54.71	0.68	45.29	1.50
jan/17	0.32	78.09	0.09	21.91	0.41
fev/17	0.19	40.23	0.28	59.77	0.47
mar/17	0.18	54.05	0.15	45.95	0.33
abr/17	0.18	32.14	0.38	67.86	0.56
mai/17	0.81	63.78	0.46	36.22	1.27
jun/17	1.08	69.23	0.48	30.77	1.56
jul/17	1.37	72.49	0.52	27.51	1.89
ago/17	1.75	78.83	0.47	21.17	2.22
set/17	0.73	73.00	0.27	27.00	1.00
out/17	0.97	65.99	0.50	34.01	1.47
nov/17	0.74	68.52	0.34	31.48	1.08
dez/17	0.51	67.11	0.25	32.89	0.76
jan/18	0.28	70.00	0.12	30.00	0.40
TOTAL	17.18		9.51		26.69

Fonte: Produção da autora.

A produção total de serapilheira em 21 meses de monitoramento foi de 26,69 Mg.ha⁻¹, o que confere ao sítio RJA uma produção média anual de 15,25 Mg ha⁻¹.ano⁻¹, no período avaliado. Freire (2017) realizou monitoramento de serapilheira na sub-parcela permanente (SPP) de 1 ha, instalada próximo à torre LBA na Rebio Jaru, e o mesmo padrão foi observado: pico de produção na estação seca, e média de 14,73 Mg ha⁻¹.ano⁻¹ em 17 meses de monitoramento.

Os fatores hídricos responderam positivamente pela variação na produção de serapilheira total/renovação foliar, cuja correlação foi positiva com lençol freático ($R^2 = 0,58$, $p < 0,001$, Lag = 3), e inversa com precipitação ($R^2=0,56$; $p < 0,001$, Lag = 1) e umidade do solo ($R^2 = 0,42$; $p < 0,003$). A fração folha seguiu o mesmo padrão, com forte correlação com lençol freático ($R^2=0,65$, $p < 0,001$, Lag = 3), e correlação inversa com precipitação ($R^2=0,57$; $p < 0,001$), e umidade do solo ($R^2=0,51$; $p < 0,001$).

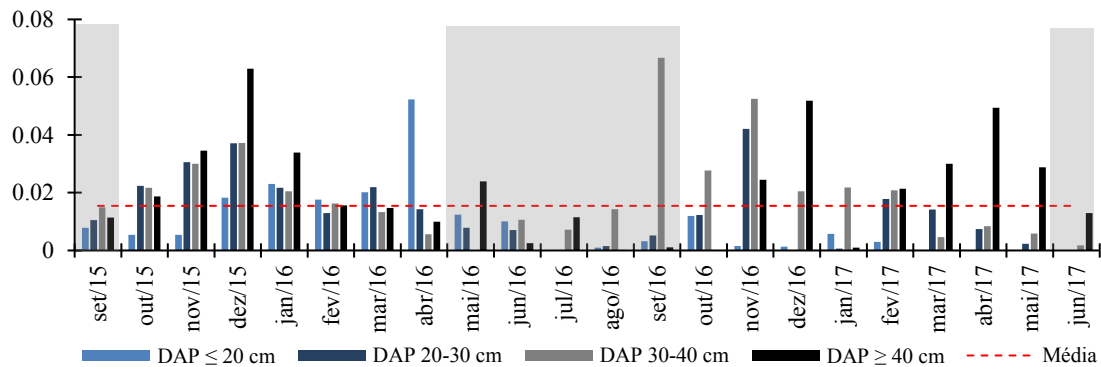
Em termos de crescimento do tronco, observou-se tendência de aumento na estação chuvosa em comparação com a estação seca, cuja sazonalidade apresentou significância estatística ($p = 0,007$). O crescimento médio anual na parcela (ROI) foi de $0,18 \pm 0,15$ cm.ano⁻¹ (Figura 4.5d). Durante a estação chuvosa de 2015/16 ($0,15 \pm 0,14$ cm) observou-se maior crescimento médio mensal em relação à estação chuvosa de 2016/17 ($0,08 \pm 0,10$ cm) ($p = 0,047$). Na estação seca de 2016, o crescimento do tronco apresentou média de $0,04 \pm 0,08$ cm. A seca de El-Niño (2015/16), sobre o sítio RJA, não apresentou alta severidade e, ocorreu após um quadro de fortes anomalias positivas de chuva em 2014. A persistente ocorrência de anomalias negativas de precipitação após a seca de El-Niño, pode ter contribuído para a redução nas taxas de crescimento observadas, dando indício de que a frequência e não tanto a severidade, foi um aspecto importante para este processo fisiológico da floresta.

A classe de diâmetro DAP ≥ 40 cm ($0,19 \pm 0,18$ cm) apresentou crescimento do tronco maior no período chuvoso de 2015/16 seguida da classe 20-30 cm de diâmetro ($0,16 \pm 0,11$ cm). No mesmo período de 2016/17 a classe de 30-40 cm ($0,13 \pm 0,11$ cm) apresentou maior incremento sazonal. No período seco de 2016, as árvores entre 30-40 cm ($0,10 \pm 0,13$ cm) representaram a classe de diâmetro com maior crescimento do tronco (Figura 4.6). No geral, a classe acima de 30 cm apresentou maior contribuição no crescimento das árvores na parcela. Essa classe é, também, a que possui maior número de indivíduos com medidas de crescimento, em que 71% delas representam árvores de dossel dominante, as quais são visíveis para o sensoriamento remoto. Os valores por período sazonal estão descritos no Apêndice B.

O crescimento do tronco apresentou tendência de redução durante a estação seca (Figura 4.5d), em que a umidade do solo respondeu por 24% ($p < 0,001$) da variação do

crescimento das árvores com 3 meses de defasagem, e a precipitação respondeu por 19% ($p = 0,003$), no período monitorado (2015/17).

Figura 4.6 - Crescimento médio mensal acumulado, sítio RJA. Box cinza representa período seco; Linha tracejada representa média mensal do período.



Fonte: Produção da autora.

Experimentos do tipo “seca floresta” reportaram que as árvores mantêm o crescimento de madeira até esgotar a sua capacidade de resistência ao estresse hídrico, em geral atingida após 4 anos de experimento (ROWLAND et al., 2015). Nesse estudo, os resultados demonstraram uma resposta mais rápida que aquela obtida nos experimentos, uma vez que as árvores apresentaram redução de 44% no crescimento médio do tronco na estação chuvosa de 2016/17 (sem El-Niño), comparado com a estação chuvosa de 2015/16 (com El-Niño), como uma possível resposta do frequente quadro de redução de chuvas nesse sítio.

A dinâmica florestal mostrou um complexo conjunto de respostas, seja na forma como responde às variações sazonais, seja aos eventos extremos. Mas todas indicando uma possível adaptação da floresta aos recursos disponíveis. Compreender esses processos, requer o uso de diferentes fontes de dados entre os quais foram usadas aqui. O SR tem fundamental contribuição, mas é preciso ter cautela na interpretação dos seus resultados, pois, os índices de vegetação carregam íntrínsecos em sua composição, tanto a resposta da interação da radiação com a bi química foliar quanto com a estrutura do dossel (WU et al., 2016).

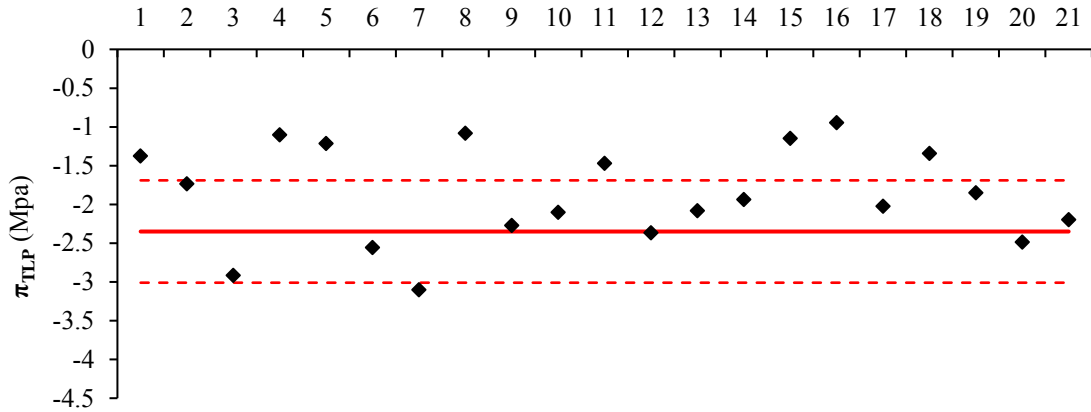
4.3.2 Traços de resistência à seca

As análises em nível de dossel mostraram que a floresta apresenta respostas distintas nos períodos secos e chuvosos, desde produção de folhas novas durante a seca, até aumento da capacidade fotossintética na estação chuvosa. As medidas de crescimento indicaram que as árvores monitoradas no sítio RJA apresentaram variações sazonais, que foram mais pronunciadas do período pós seca (2016/17). As análises a seguir visam avaliar o potencial destas árvores em resistir a eventos de seca, por meio de atributos funcionais que são utilizados como indicativos de tolerância.

4.3.2.1 Ponto de perda de turgor (π_{TLP})

O π_{TLP} é um atributo funcional que representa o potencial hídrico abaixo do qual as plantas perdem turgor celular e, conseqüentemente podem fechar os estômatos, cessar as trocas gasosas, e morrer por falta de carbono (*carbono starvation*) (BARTTLET et al., 2012). Baseado nisso, este atributo tem sido utilizado como um indicativo de tolerância à seca, no qual potenciais hídricos mais negativos indicam maior resistência das árvores às forçantes do ambiente. No sítio RJA, entre as espécies monitoradas, apenas uma espécie apresentou alta resistência, com base no intervalo de confiança estabelecido para Florestas Tropicais Sazonais ($\pi_{TLP} > -3,01$ MPa) baseado em Barttlet et al. (2012). Doze indivíduos apresentaram resistência moderada ($-1,69 \geq \pi_{TLP} \geq -3,01$ MPa), e oito indivíduos tiveram valores de π_{TLP} dentro da classe de baixa resistência ($\pi_{TLP} > -1,69$ MPa) (Figura 4.7). Os valores por espécies estão apresentados no Apêndice C.

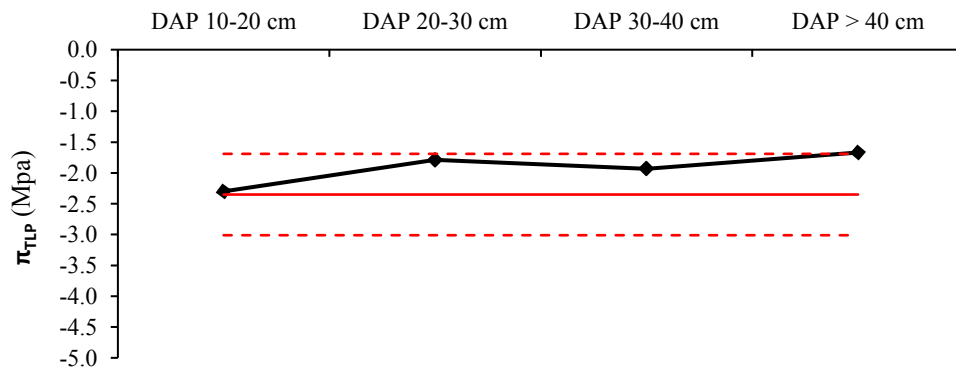
Figura 4.7 - π_{TLP} das espécies analisadas (n=21), sítio RJA. Linha tracejada representa limites do π_{TLP} para Florestas Tropicais Sazonais (BARTTLET et al., 2012). Linha vermelha representa a média.



Fonte: Produção da autora.

As espécies mais finas ($DAP \leq 20$ cm) apresentaram π_{TLP} mais negativo, com média de $-2,2 \pm 0,74$ MPa. As espécies com $DAP > 20$ cm representaram a classe de diâmetro com π_{TLP} menos negativo, com média de $-1,73 \pm 0,08$ MPa (Figura 4.8). Contudo, não houve diferença estatística significativa entre as classes de diâmetro ($p = 0,15$). Todas as classes apresentaram valores médios dentro do intervalo de confiança (IC) estabelecido para Florestas Tropicais Sazonais (BARTLETT et al., 2012). Os valores por classe de diâmetro estão apresentados na Tabela 4.3, item 4.3.2.2.

Figura 4.8 - Média do π_{TLP} por classe de diâmetro, sítio RJA. Linha tracejada representa limite do π_{TLP} para Florestas Tropicais Sazonais (BARTTLET et al., 2012). Linha vermelha representa a média ($-2,35 \pm 0,66$ MPa).



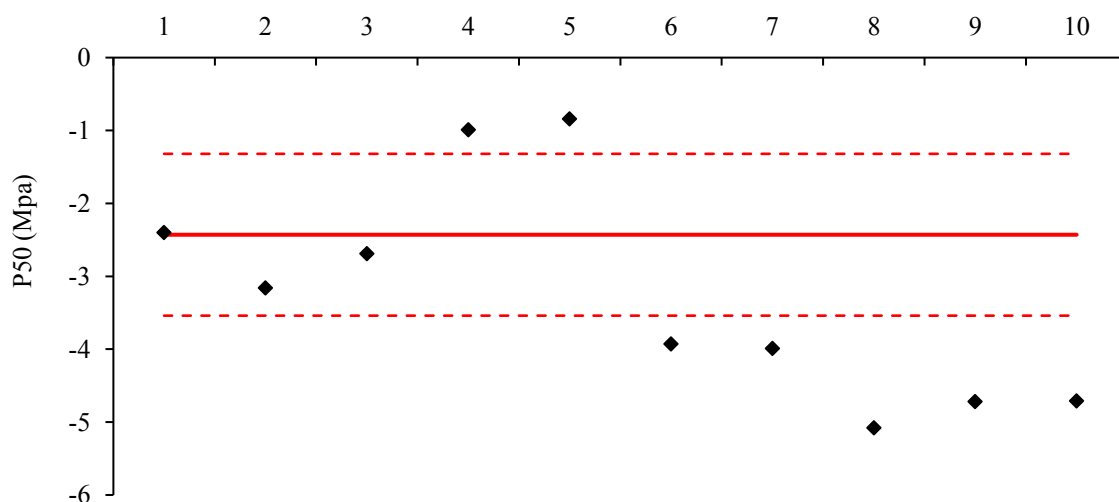
Fonte: Produção da autora.

Considerando a região de interesse (ROI) desta pesquisa, a média do π_{TLP} foi de $-1,87 \pm 0,63$ MPa, ou seja, a parcela classifica-se como de moderada resistência à seca. Este valor é próximo ao observado por Barros (2018) para árvores típicas de florestas tropicais ($\pi_{TLP} -1,99 \pm 0,19$ MPa).

4.3.2.2 P₅₀

De acordo com o intervalo de confiança do P₅₀, estabelecido com base em Choat et al. (2012), duas espécies apresentaram baixa resistência à seca (id 380 e 382) ($P_{50} > -1,32$ MPa), três espécies resistência moderada (id 381, 31 e 137) ($-1,32 \geq P_{50} \geq -3,54$ MPa), e cinco espécies tiveram P₅₀ no intervalo de alta resistência (id 167, 168, 286, 183 e 254) ($P_{50} < -3,54$ MPa) (Figura 4.9). Considerando todos os indivíduos analisados, o P₅₀ médio para a parcela foi de $-3,25 \pm 1,51$ MPa, que abrange a classe de resistência moderada. Esta média observada no sítio RJA, representa resistência à seca maior que nos sítios pouco sazonais da Amazônia, a exemplo de Manaus ($P_{50} -2,34 \pm 0,89$ MPa) (BARROS, 2018), e também aos sítios que possuem cerca de cinco meses de estação seca, a exemplo de Tapajós ($P_{50} -2,90 \pm 1,15$ MPa) (BARROS, 2018) e Caxiuanã ($P_{50} -2,04 \pm 1,28$ MPa) (ROWLAND et al., 2015).

Figura 4.9 - P₅₀médio por espécie (n=10), sítio RJA. Linha tracejada representa limite do P₅₀ para Florestas Tropicais Sazonais (CHOAT et al., 2012). Linha vermelha representa a média ($-2,43 \pm 1,11$ Mpa).



Fonte: Produção da autora.

Os indivíduos incluídos na classe de diâmetro ≤ 20 cm (finas) apresentaram maior P_{50} ($-1,51 \pm 1,03$ MPa), que equivale a uma menor resistência à seca, e os indivíduos com DAP > 20 cm (largas) apresentaram menores valores ($-3,63 \pm 1,21$ MPa) (Tabela 4.3), indicando que árvores com diâmetro > 20 cm foram mais resistentes à seca com base nesse conjunto de dados. Em termos da parcela de estudo, todas as classes de diâmetro apresentaram resistência à seca que variou de moderada (DAP entre 10 e 30 cm) à alta (DAP > 30 cm).

Tabela 4.3 - π_{TLP} e P_{50} por classe de diâmetro, sítio RJA. π_{TLP} e P_{50} em MPa; σ = desvio padrão.

Classe de diâmetro	Indivíduos	π_{TLP}		Indivíduos	P_{50}	
		Média	σ		Média	σ
DAP 10-20 cm	n=5	-2.22	0.74	n=3	-1.507	1.028
DAP 20-30 cm	n= 5	-1.66	0.74	n=2	-2.780	0.537
DAP 30-40 cm	n= 6	-1.82	0.57	n=5	-4.486	0.503
DAP > 40 cm	n= 6	-1.71	0.50	-	-	-

Fonte: Produção da autora.

No contexto Amazônico, as árvores grandes têm apresentado maior vulnerabilidade à seca, nos estudos conduzidos, especialmente, na Amazônia Ocidental. Barros (2018) observou que o P_{50} tende a ser maior (menos negativo) em árvores largas. Rowland et al. (2015) também observaram valores médios de P_{50} de $-1,70 \pm 0,86$ MPa para árvores com DAP ≥ 30 cm, em comparação com $-2,45 \pm 1,58$ MPa registrado para árvores com DAP < 30 cm. No sítio RJA, as árvores grandes (> 20 cm) apresentaram maior tolerância à seca que as árvores finas, contrapondo os resultados observados em outras regiões amazônicas.

4.3.2.3 Isohidricidade

As curvas diárias foram montadas com os dados de potencial hídrico foliar (Ψ_F), medido ao longo do dia, para avaliar a isohidria das espécies monitoradas, nos dois períodos analisados: chuvoso (outubro de 2016) e seco (julho de 2017). O potencial hídrico foliar ao amanhecer (Ψ_{FD}) alcançou valores entre $-0,238$ e $-0,633$ MPa, com média de $-0,446 \pm 0,09$ MPa no período seco. Na estação chuvosa, Ψ_{FD} apresentou valores de $-0,258$ a $-0,850$ MPa, com média de $-0,506 \pm 0,17$ MPa (Apêndice C). O potencial hídrico ao meio-dia (Ψ_{MD}), no período seco, esteve entre $-0,213$ e $-2,564$ MPa, com média de $-1,264 \pm 0,80$ MPa. No período chuvoso, observou-se valores de Ψ_{MD} entre $-0,410$ e $-2,743$ MPa, com média de $-1,722 \pm 0,73$ MPa (Apêndice C).

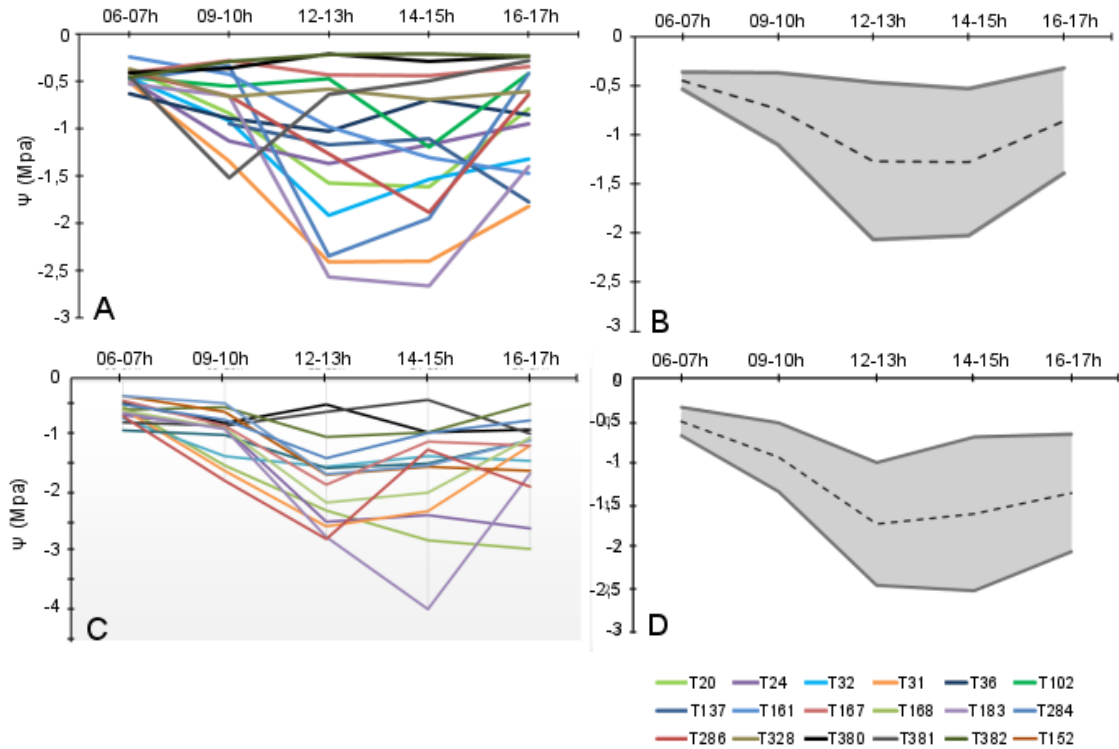
O potencial hídrico foliar (Ψ_F) geralmente declina durante o dia, acompanhando as alterações abióticas. Durante a noite o Ψ_F é reabastecido, e até o final da noite alcança valores próximos ao potencial hídrico do solo, restabelecendo o equilíbrio do contínuo solo-planta-atmosfera. Portanto, o *predawn* (Ψ_{PD}) tem sido assumido como um *proxy* do potencial hídrico do solo (RICHTER, 1997; KONINGS; GENTINE, 2016). No sítio RJA, os valores de Ψ_{PD} na estação seca e na estação chuvosa não apresentaram diferença significativa ($\alpha = 0,05$). Os valores nesse sítio estão acima (menos negativo) dos observados em outras regiões amazônicas, a exemplo de Barros (2018) que observou valor médio de -0,89 MPa para árvores tropicais, e Choat et al. (2012) que registraram -1,79 MPa de potencial hídrico mínimo para florestas tropicais sazonalmente secas. Esse resultado indica o potencial das árvores em captar água do solo para manter as necessidades hídricas durante o dia, já que, os valores de Ψ_{PD} retornam ao máximo pela manhã em ambas as estações avaliadas.

Durante o período seco, o potencial hídrico foliar alcançou valores mínimos entre 12:00-13:00h em cinco espécies (-1,03 a -2,40 MPa) (ID 24, 32, 31, 36 e 284). Entre 14:00-15:00h, sete espécies apresentam valores mínimos de Ψ_F (-0,43 a -2,66 MPa) (ID 20, 102, 161, 167, 183, 286 e 328). No período chuvoso, o Ψ_F atinge valores mínimos às 12:00-13:00h em 10 das 15 espécies avaliadas (-0,97 a -2,74 MPa).

O potencial hídrico foliar ao longo do dia, manteve-se frequentemente mais baixo no período chuvoso (outubro) (Figura 4.10c) do que no ápice da estação seca (julho) (Figura 4.10a). No contexto da parcela (ROI), um mínimo platô do potencial hídrico foliar foi observado na estação chuvosa (Figura 4.10d), com valores que chegaram até -3,97 MPa (para *D. odorata*) (Figura 4.10c). Nessa estação, foi observado também, aumento da capacidade fotossintética e crescimento do tronco, indicando maior requerimento de água pelas plantas.

O Ψ_F excedeu o limite do ponto de perda de turgor em quatro espécies no período seco (ID 183, 137, 31 e 20), e em dez espécies no período chuvoso (ID 20, 24, 31, 137, 152, 167, 168, 183, 286 e 380) (Apêndice E). O horário entre 12-13h foi o principal período do dia em que o π_{TLP} foi excedido. No geral, após ultrapassar este limiar, as espécies retornam ao potencial acima do π_{TLP} estabelecido, exceto *M. suaveolens* (chuvoso), *P. egléri* (seco) e *D. guianense* (chuvoso), que compreendem árvores com DAP > 30 cm.

Figura 4.10 - Potencial hídrico foliar diário (Mpa), sítio RJA. (A) valores por espécie no período seco (n=16); (B) valor médio diário e desvio padrão (box cinza) no período seco; (C) valores por espécie no período chuvoso (n=17); (D) valor médio diário e desvio padrão (box cinza) no período chuvoso.



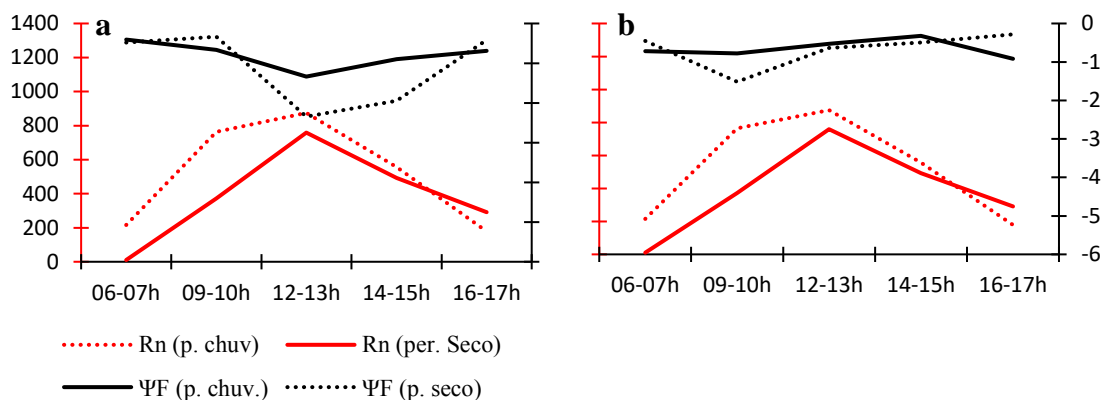
Fonte: Produção da autora.

Um exemplo de comportamento anisohídrico é apresentado na Figura 4.11 (a), como padrão dos indivíduos classificados como anisohídricos no sítio RJA, em que se observa variação no Ψ_F ao longo do dia conforme variam as condições climáticas. O Ψ_F variou com a temperatura do ar para 63% das espécies no período seco e 82% no período chuvoso, ou seja, com aumento da temperatura durante o dia ocorre diminuição do Ψ_F (mais negativo). O Ψ_F também diminuiu com o incremento na radiação líquida ao longo do dia em 69% (p. seco) e 12% (p. chuvoso) dos indivíduos. Contudo, a medida que a umidade relativa do ar diminui, menor é o Ψ_F , este padrão foi observado em 44% (p. seco) e 65% (p. chuv.) dos indivíduos.

Um típico comportamento isohídrico também foi observado entre indivíduos no sítio de estudo (Figura 4.11b), em que pequenas mudanças no Ψ_F são observadas independente das condições climáticas durante o dia. Este padrão foi notado em 25% dos indivíduos

avaliados no período seco e em 24% dos indivíduos avaliados no período chuvoso. Os valores por espécie estão apresentados na Tabela D, Apêndice D.

Figura 4.11 - Padrão de isohidricidade, sítio RJA. (a) Radiação líquida (Rn) e Ψ_F (Mpa) nos dois períodos sazonais avaliados para espécie *Licania sprucei*, típico comportamento anisohídrico; (b) Radiação líquida (Rn) e Ψ_F (Mpa) nos dois períodos sazonais avaliados para espécie *Virola michelii*, típico comportamento isohídrico.



Fonte: Produção da autora.

A partir dos resultados da análise deste atributo funcional assumimos para a parcela desta pesquisa o padrão de comportamento anisohídrico, consolidando para a parcela (ROI), em conjunto com os resultados dos atributos P_{50} e π_{TLF} , tolerância à seca em nível moderado.

5. DISCUSSÕES

5.1 Como é a dinâmica sazonal e interanual da floresta na porção sudoeste da Amazônia?

Conforme apresentado no item 4.2, a dinâmica da floresta em termos de fenologia do dossel, com uso do EVI e Gcc, em uma análise temporal de longo prazo (2000/2017) não evidenciou comportamento padronizado nos anos de ocorrência de eventos severos de seca. De forma interanual, esta resposta demonstra que na região de estudo somente a ocorrência de um episódio de seca não caracteriza impacto imediato nos padrões sazonais esperados para a dinâmica florestal. Efeito pós-seca foi observado no crescimento do tronco que, mostrou redução após o episódio de El-Niño de 2015/16, como uma possível resposta às anomalias negativas que se mantiveram frequentes até meados de 2017.

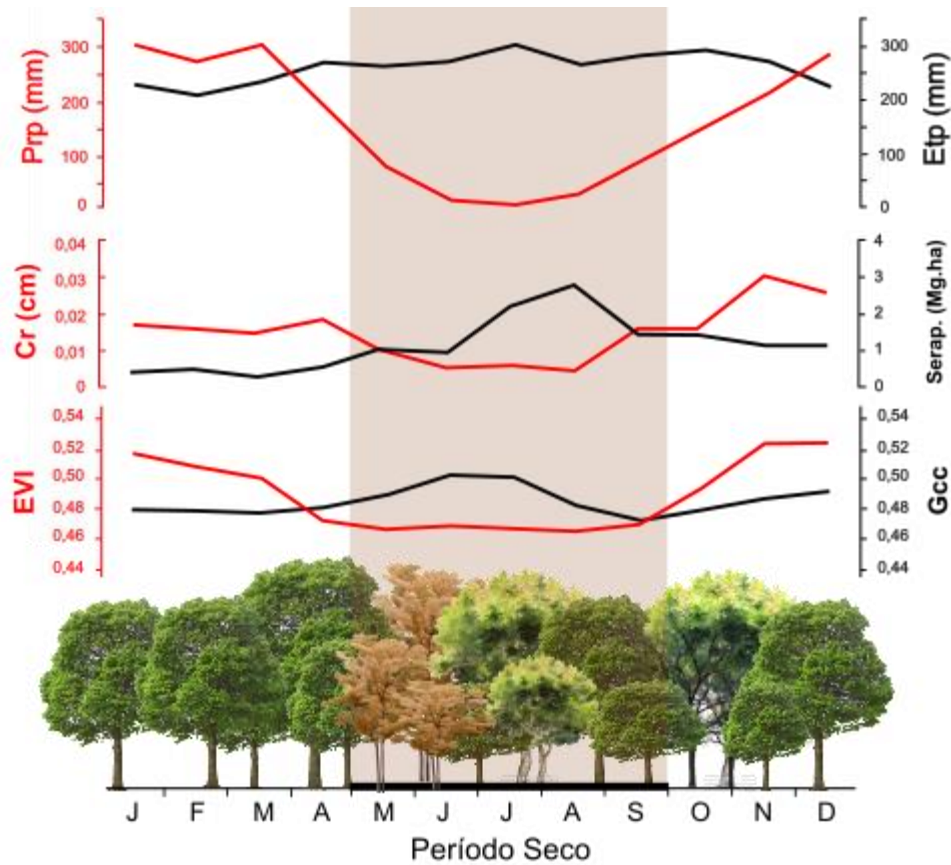
Sazonalmente, os padrões fenológicos e fisiológicos mostram uma articulação coerente em termos de estratégia de sobrevivência à estação seca que, alcança em média, um total de chuvas em torno de 250 mm nos 5 (cinco) meses de duração. O crescimento do tronco é priorizado na estação chuvosa, e a renovação foliar (vide serapilheira e Gcc) na estação seca (Figura 5.1), cujo investimento da planta em diferentes tecidos, seguindo a sazonalidade climática, também foi observada em outros sítios amazônicos (RESTREPO-COUBE et al., 2015). Como visto, a sazonalidade do crescimento tende a ocorrer em fase com a sazonalidade da precipitação ($R^2=0,51$, $p=0,009$) (Figura 5.1), esta tendência foi observada nos estudos conduzidos em diversos biomas (ZWEIFEL et al., 2005; 2006; WAGNER et al., 2014; 2016). Nas florestas tropicais essa relação do crescimento de madeira com as chuvas tem sido observada independente se água ou luz atua como fator limitante (WAGNER et al., 2014; 2016), uma vez que a baixa disponibilidade de água inibe o processo de expansão celular (KREPKOWSKI et al., 2011). Zweifel et al. (2006) afirmam que pequenos eventos de chuva podem acelerar o crescimento radial, mesmo sem umedecer o solo ou reidratar totalmente a árvore. Isso indica que mais importante que a água armazenada no solo, são as chuvas para o crescimento de madeira, e uma mudança nos padrões de chuva sobre essa região pode levar à efeitos no crescimento das árvores.

Na estação seca, também foi observada menor capacidade fotossintética (vide EVI) e aumento na produção de folhas novas (vide Gcc e Sr) (Figura 5.1). Isso sugere que a renovação foliar, além das condicionantes climáticas, também é um processo que se relaciona com a sazonalidade do crescimento de madeira, uma vez que o aumento na quantidade de folhas novas desvia energia da formação de madeira para a formação de tecidos foliares (RESTREPO-COUBE, et al., 2013). A sazonalidade do crescimento acompanhando a sazonalidade do EVI, confirma esta partição de energia, pois, a formação de madeira tende a ocorrer na estação com maior disponibilidade de recursos p.e. (água, nutrientes e carbono). A redução no crescimento no sítio RJA, durante a seca, corrobora estudos globais que têm observado diminuição na produtividade primária líquida impulsionada pela seca (ZHAO; RUNNING, et al. 2010) e diminuição no crescimento em grande parte da Amazônia (PHILLIPS et al., 2009; WAGNER et al. 2013).

A produção de serapilheira aumentou no período seco e diminuiu no período chuvoso (Figura 5.1). De certa forma isso corrobora a sazonalidade do EVI, de aumento no período chuvoso e diminuição no período seco ($R^2 = 0,74$, $p < 0,001$), quando é esperado que as folhas novas atinjam maturidade 3-5 meses após serem produzidas (LOPES et al., 2016; WU et al., 2016), aumentando, assim, a capacidade fotossintética do dossel.

O Gcc, em termos de média histórica, foi uma medida importante para caracterizar a renovação foliar na área de estudo, e identificar um aspecto bisazonal de *leaf flush*. Mas o seu uso para avaliar a sazonalidade da fenologia do dossel em escala temporal reduzida, precisa ser analisado com cautela, em virtude da rápida resposta deste índice às mudanças no dossel em termos de perda e renovação de folhas, a qual ocorre o ano inteiro.

Figura 5.1 - Padrão sazonal baseado na média histórica das variáveis. Prp = precipitação (NOAA 1983/2015); Etp = evapotranspiração (MOD16A2 2001/17); Cr = crescimento (RJA 2015/17); Serap. = serapilheira (RJA 2016/17); EVI (MODIS/MAIAC 2000/17); Gcc (MODIS/MAIAC 2000/17).



Fonte: Produção da autora.

5.2 O sensoriamento remoto tem potencial para representar as mudanças fenológicas e fisiológicas da floresta?

Conforme apresentado anteriormente (item 4.3), o EVI apresentou maior correlação com a chuva do que com a radiação líquida. Este resultado confirma as evidências levantadas por Guan et al. (2015), Wagner et al. (2016) e Bertani et al. (2017), ou seja, em regiões amazônicas com precipitação abaixo do limiar de $2.000 \text{ mm.ano}^{-1}$ (GUAN et al., 2015; WAGNER et al., 2016) ou $1.943 \text{ mm.ano}^{-1}$ (BERTANI et al., 2017), a fotossíntese, avaliada com EVI e SiF, é menor durante o período seco em comparação ao período chuvoso.

A variação sazonal do Gcc foi condizente com a característica da região de estudo, em que se observa troca foliar durante o ano inteiro, embora maior na estação seca, e em menor proporção na chuvosa. A ocorrência de *leaf flush* durante a estação seca tem sido reportada em outras regiões da Amazônia Oriental p.e. (HUETE et al., 2006; ANDERSON et al., 2011; GUAN et al., 2015; LOPES et al., 2016) e agora, com esse conjunto de dados, no sítio RJA localizado na Amazônia Ocidental. Os resultados aqui apresentados demonstram uma característica bisazonal de *leaf flush*, com picos ocorrendo na estação seca, e no início da estação chuvosa (Figura 4.5f). A sazonalidade da serapilheira apresentou, também, maior produção na estação seca, e redução gradativa até meados da estação chuvosa (Figura 4.5c), corroborando o padrão observado com o Gcc (histórico). Em uma análise da média mensal histórica do Gcc e das médias mensais da serapilheira total, esta, explicou 60% da variação do Gcc com um mês de atraso ($p = 0,005$) (Figura 5.1), contudo, esta correlação é enfraquecida e não significativa quando testada apenas no período de estudo ($R^2 = 0,09$, $p = 0,24$).

O EVI não segue as mudanças na estrutura do dossel associadas a renovação foliar, ao contrário disso, observou-se uma tendência fora de fase entre essas duas medidas (EVI x Gcc $R^2 = 0,15$ $p = 0,05$, Lag = 2; EVI x Serapilheira total $R^2 = 0,54$, Lag = 3) (Figura 5.1). Maeda et al. (2014) observaram este mesmo padrão em defasagem, mas não concluíram os motivos pelo qual eles acontecem. Nesse sentido, tem sido abordado que as folhas novas tendem a ter maior transmitância da radiação infravermelha do que as folhas maduras, portanto, é de se esperar que, na medida que as folhas caem e são trocadas, o EVI diminua, como resposta à sua dependência com a banda do infravermelho próximo (MOURA et al., 2012; GALVÃO et al., 2013; MOURA et al., 2017), cuja região do espectro interage com os espaços intercelulares do mesófilo foliar (JENSEN, 2009; PONZONI et al., 2012). E na medida em que as folhas novas atingem maturidade e o dossel aumenta sua área foliar, observa-se aumento do EVI.

A média mensal do crescimento radial (Cr) e EVI, apresentou correlação significativa ($R^2=0,17$, $p\text{-value} = 0,05$), sendo observado que o crescimento radial aumenta quando a capacidade fotossintética também apresenta incremento (Figura 5.1). Esta correlação é melhorada quando comparada com as médias mensais históricas ($R^2 = 0,62$, $p = 0,002$).

Portanto, é de se esperar que a precipitação seja a forçante climática de maior influência tanto para a dinâmica do crescimento, quanto para a capacidade fotossintética da floresta.

Já o Gcc e Cr apresentaram correlação inversa, embora não significativa ($R^2 = 0,18$, $p = 0,07$, $Lag = 3$), ou seja, enquanto a produção de folhas novas aumenta, o crescimento do tronco é reduzido (Figura 5.1). A fraca correlação entre essas variáveis se dá, devido à falta de sazonalidade nos dados do Gcc. Wagner et al. (2013) observaram em florestas tropicais da Guiana Francesa, que os processos de produção de madeira e folhas ocorrem separadamente. Para esta análise utilizaram medidas de serapilheira, crescimento de madeira com dendrômetros de banda, e dados de EVI como *proxy* da capacidade fotossintética (produto MODIS/MOD13Q1). Os autores observaram que o pico do EVI ocorre com um atraso de 3,5 meses com o crescimento de madeira ($R=0,70$), e que na estação seca, quando ocorre renovação foliar impulsionada pela radiação, o crescimento de madeira cessa. Já no início da estação chuvosa, quando as folhas estão maduras e a água está disponível, o crescimento retorna rapidamente, refletindo uma mudança na alocação de carbono de órgãos vegetais de vida curta (folhas) para os de vida longa (madeira). Esse padrão foi observado nesta pesquisa, corroborando que em sítios limitados por água também ocorre o processo de alocação de recursos pelas plantas. Mas diferentemente de Wagner et al. (2013), o produto MODIS utilizado nessa pesquisa, corrigidos os efeitos atmosféricos e artefatos da geometria sensor-sol com o algoritmo MAIAC, evidenciou uma correlação positiva entre EVI e crescimento das árvores sem defasagem de $R^2=0,17$ ($p = 0,05$) no período de estudo (2015/17). Avaliando as médias históricas o EVI responde por 62% da variação no crescimento do tronco ($p = 0,002$) (Figura 5.1).

Estes resultados revelam o potencial do sensoriamento remoto em avaliar a dinâmica florestal e, em outros casos, subsidiar a interpretação integrada das respostas sazonais da floresta no contexto do sistema solo-planta-atmosfera.

5.3 Quais estratégias da floresta para suportar a seca sazonal?

Em decorrência de um déficit hídrico, as plantas podem agir para impedir a falha hidráulica por meio do fechamento dos estômatos, que causa consequente redução na transpiração e fotossíntese (SEVANTO et al., 2013). No sítio RJA, diferentes árvores

apresentaram diferentes estratégias de sobrevivência durante períodos de limitada disponibilidade hídrica, variando entre espécies que regulam os estômatos durante o dia (isohídricas) àquelas que não realizam a regulação estomática conforme variam as condições climáticas (anisohídricas). No período chuvoso (outubro), 76% das árvores analisadas apresentaram comportamento anisohídrico, e no período seco (julho) 75%. Plantas anisohídricas, sob condições ótimas e sob condições de seca leve à moderada, mantêm maior condutância estomática (g_s) e assimilação de CO_2 do que plantas isohídricas (KUMAGAI; PORPORATO, 2012).

O padrão observado na evapotranspiração (Etp/MODIS), de leve aumento durante a estação seca mantendo-se quase constante o ano inteiro, corrobora a característica anisohídrica predominante nas espécies do sítio RJÁ que, mantêm sua capacidade de realizar trocas gasosas devido à baixa regulação estomática mesmo durante a estação seca e, na existência de energia (R_n) e água no sistema, parte da radiação líquida é usada nos processos metabólicos das plantas, parte é transformada em calor sensível que aquece o solo e atmosfera, e uma maior parte é geralmente utilizada para evapotranspirar a água (HILEL, 2008).

Outra estratégia de sobrevivência das plantas é a abscisão foliar, reportada como um mecanismo de adaptação dos vegetais a períodos secos, utilizada para minimizar a perda de água por transpiração (LARCHER, 2000). O aumento na produção de serapilheira, no sítio RJÁ, ocorre durante o período seco, mas este padrão parece não refletir uma estratégia de minimização de perda de água, pois, embora haja menor precipitação, é neste período que se observa um suave incremento na evapotranspiração, avaliada com MODIS e corroborada por prévios estudos (VON RANDOW et al., 2004; ANDRADE et al., 2009), e aumento na produção de novas folhas.

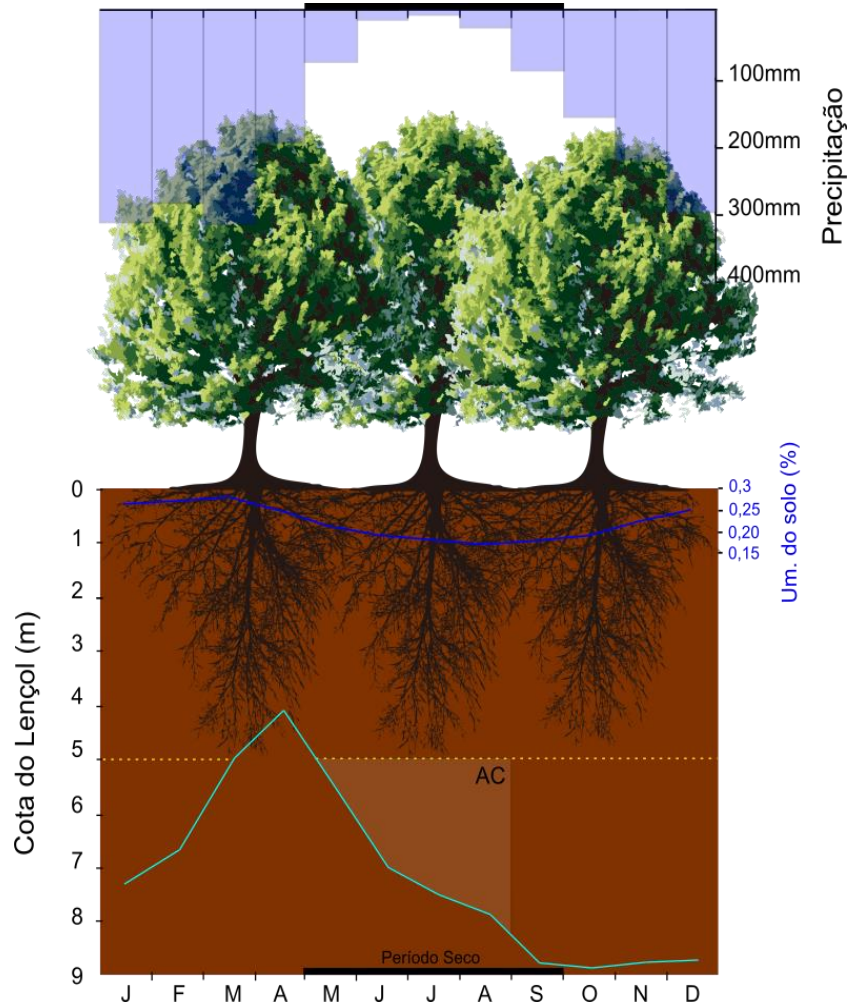
A evapotranspiração (Etp) tem sido utilizada como um indicativo de que a floresta amazônica suporta bem a estação seca, em virtude de em algumas regiões, a Etp apresentar valores maiores na seca do que na estação chuvosa (SHUTTLEWORTH, 1988; VON RANDOW et al., 2004; HUETE et al., 2006), assim como observado nesta pesquisa. A questão é, como altas taxas de Etp podem ser mantidas em períodos de baixa precipitação? Essa resposta tem sido sustentada pela hipótese de que as plantas produzem raízes capazes de captar água de camadas profundas do solo (VON RANDOW et al.,

2004; ROCHA et al., 2004), mas o conhecimento da profundidade de raízes ainda é escasso (FAN; MIGUEZ-MACHO, 2010). Durante as sondagens para coleta de solo no sítio RJA, observou-se raízes finas até a profundidade escavada de 5 m, e a cota do lençol freático atinge mais de 8 metros em setembro, no final da estação seca e início da chuvosa (Figura 5.2). Baseado nisso, o aumento da Etp na estação seca — identificado com dados obtidos remotamente e corroborados pela literatura —, e o aumento na produção de folhas novas neste período — identificado pelo Gcc e serapilheira —, podem ser explicados por alguns mecanismos identificados na área de estudo, e com base em prévios estudos desenvolvidos na Reserva Jarú: i) o armazenamento de água na estação chuvosa mantém a Etp na estação seca, ii) raízes profundas mesmo que insignificantes em massa, são eficientes para captar água do solo, eventualmente distribuindo-a para as raízes mais rasas via redistribuição hidráulica (NEPSTAD et al., 2001; VON RANDOW et al., 2004; ROCHA et al., 2004; OLIVEIRA et al., 2005), iii) na estação seca, o fluxo de água no solo é forçado por capilaridade, das camadas mais profundas e úmidas para as camadas mais rasas e secas, estimado ser para a Reserva Jarú em torno de $2,8 \text{ mm.dia}^{-1}$ (ROCHA et al., 2004; DA ROCHA et al., 2009; FAN; MIGUEZ-MACHO et al., 2010), e como abordado aqui, o *predawn* dá evidências da ocorrência desse processo, favorecido pelos solos argilosos, que apresentam condições favoráveis de retenção de água, e iv) a menor regulação estomática pelas plantas anisohídricas, associada ao suprimento de água e à disponibilidade de radiação líquida, possibilita as trocas gasosas e, conseqüentemente a manutenção de altas taxas de Etp e produção de folhas novas na estação seca, mantendo a Etp quase constante o ano inteiro.

As análises de solo mostraram homogeneidade dos perfis analisados. Como resultado, observa-se solos pobres em nutrientes e uma fina camada rica em matéria orgânica até 0,20 m. Com isso, grande parte do aporte de nutrientes para as plantas tem origem na decomposição da biomassa que cai sobre o chão da floresta. Freire (2017) observou um coeficiente de decomposição (K) de 1,44 para o sítio RJA, o que comprova uma alta efetividade dos organismos decompositores em ciclar os nutrientes para o sistema e o rápido aproveitamento pela vegetação (PAGANO, 1989). Neste mesmo estudo, foi observado que a decomposição de 50% do material ocorre em um tempo médio de 176 dias (FREIRE, 2017). O aumento da serapilheira no início do período seco fornece,

portanto, os nutrientes necessários para os processos metabólicos das plantas, uma vez que o solo nessa área possui baixa fertilidade e baixo teor de nutrientes.

Figura 5.2 - Esquema do suprimento de água pela planta via lençol freático, precipitação e umidade do solo. AC = ascensão capilar.



Fonte: Produção da autora.

Em relação ao crescimento radial (Cr), as árvores mais finas (DAP < 20 cm) apresentaram menor crescimento em todos os períodos sazonais avaliados em comparação com as árvores largas (DAP > 20 cm), cuja taxa de crescimento é reduzida na estação seca considerando todas as classes de diâmetro. As árvores com diâmetro < 20 cm apresentaram menor resistência à seca do que as de diâmetro superior (> 20 cm), considerando os atributos P_{50} ($-1,51 \pm 1,03$ MPa) e comportamento isohídrico.

As árvores largas (DAP > 20 cm) apresentaram maior crescimento no sítio RJA. Com os atributos funcionais π_{TLP} ($-1,73 \pm 0,08$ MPa) e comportamento anisohídrico

predominante, observou-se moderada resistência à seca destas classes de diâmetro. Este padrão indica a capacidade em manter os estômatos abertos, mesmo durante períodos críticos, o que possibilita a manutenção do metabolismo da árvore para investir em crescimento, quando a água não é um fator limitante.

A análise por meio dos atributos funcionais de tolerância à seca, mostrou um *tradeoff* entre crescimento e tolerância. Árvores largas, no contexto amazônico, são apontadas como mais vulneráveis à seca, sendo mais propensas à mortalidade que árvores finas (PHILLIPS et al., 2009, 2010; ROWLAND et al., 2015). Baseado no conjunto de atributos analisados (P_{50} , π_{TLP} e isohidricidade) nessa pesquisa, as árvores de maior diâmetro, em geral, foram mais resistentes à seca, devido apresentar maior taxa de crescimento, menor P_{50} (mais negativo) e comportamento anisohídrico (manutenção de trocas gasosas). Por outro lado, as árvores finas ($DAP \leq 20$ cm) cresceram menos e tiveram P_{50} maior (menos negativo) em comparação com grandes árvores, como um potencial reflexo do maior controle estomático das espécies desta classe de diâmetro, que apresentam comportamento isohídrico. Isso indica que o maior controle estomático durante a seca, é uma estratégia de adaptação que, resulta para o caso das espécies mais finas, na redução do crescimento devido limitar a capacidade de trocas gasosas.

Embora tenham sido observadas diferenças entre classes de diâmetro, no contexto da parcela (ROI), todas as classes mostraram resistência à seca dentro dos limites estabelecidos para os atributos funcionais com base em Bartlett et al. (2012) e Choat et al. (2012), conferindo ao sítio RJA moderada resistência à seca. Ao nível de indivíduo ou classes de diâmetro, esses atributos precisam ser avaliados com cautela, uma vez que, eles representam diferentes processos de adaptação das plantas às forçantes do ambiente.

Levando em consideração a tendência de aumento no crescimento (Cr) das árvores com aumento da precipitação ($R^2 = 0,51$), depreende-se que, os processos da planta para investir em madeira são supridos, principalmente, pela água da chuva. Já a tendência de aumento da serapilheira total com aumento do lençol freático ($R^2 = 0,54$, $p < 0,001$, $Lag = 3$), visto que, a serapilheira foi utilizada como uma medida indireta do crescimento de folhas novas, estas relações indicam que a água do lençol é utilizada pela planta para o processo de renovação foliar. A água é, portanto, a principal forçante climática da dinâmica florestal no sítio RJA.

6 CONCLUSÕES

Baseado no conjunto de dados abordados nesta pesquisa, importantes processos da dinâmica da floresta foram melhor compreendidos para o sítio RJA, contribuindo para o debate da sazonalidade de florestas tropicais e tolerância à seca. Diante disso, observou-se um comportamento da floresta de forma não padronizada em relação às variações interanuais do clima. Sazonalmente, a dinâmica florestal mostrou padrões bem definidos de redução da capacidade fotossintética, redução no crescimento do tronco e aumento na produção de folhas novas na estação seca em comparação com a estação chuvosa.

Em termos de fenologia do dossel, durante o episódio de seca de El-Niño em 2015/16, com as maiores anomalias de chuva ocorrendo na estação chuvosa, foram observados valores de ΔEVI e ΔGcc frequentemente negativos. Contudo, em termos de crescimento do tronco os efeitos deste episódio de seca agregado à frequência das anomalias negativas de chuvas, foram observados nas estações seguintes (pós El-Niño), o que indiretamente pode implicar em consequência na produtividade da floresta, caso as projeções de aumento de temperatura em conjunto com a redução na precipitação sejam constantes e/ou severas, sugerindo que, a frequência dessas anomalias possa ser crítica para a floresta, independente da intensidade do episódio de seca. Já em termos de tolerância à seca, as análises ecofisiológicas demonstraram para a parcela (ROI), condição de resistência moderada à seca pelas espécies monitoradas.

No sítio RJA a sazonalidade fora de fase entre renovação foliar e crescimento do tronco, com priorização de um em detrimento do outro na estação seca e chuvosa, evidenciou uma mudança na alocação de recursos entre essas estações. O EVI derivado do MODIS/MAIAC, apresentou defasagem com a serapilheira, indicando um aumento da capacidade fotossintética da floresta quando as folhas atingem maturidade. A sazonalidade do EVI, também ocorreu fora de fase com a sazonalidade do Gcc, com isso, o Gcc foi um melhor indicador do *leaf flush*, por ocorrer durante os picos de produção de serapilheira, enquanto o EVI representou a capacidade fotossintética de folhas maduras, por apresentar aumento entre 3 a 5 meses depois do maior pico no Gcc.

O entendimento da dinâmica florestal a partir de abordagens orbitais é de fundamental importância para a ciência ambiental e para o contexto climático. Contudo, é

indispensável, o uso de dados *in situ* para validação dos dados obtidos do espaço. Esta pesquisa, trouxe uma nova contribuição para o banco de dados sul amazônico no que se refere a medidas aprofundadas de ecofisiologia vegetal e suas integrações com os dados de sensoriamento remoto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, N. L. R. et al. Partição do saldo de radiação em áreas de floresta amazônica e floresta de transição Amazônia-Cerrado. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.3, 346-355, 2009.
- ANDRADE, D. F. et al. Inventário florestal de grandes áreas na Floresta Nacional do Tapajós, Pará, Amazônia, Brasil. **Biota Amazônia**, v. 5, n. 1, p. 109-115, 2015.
- ANDRADE, R. T. G. et al. Fitossociologia de uma floresta de terra firme na Amazônia Sul-Occidental, Rondônia, Brasil. **Biota Amazônia**, v. 7, n. 2, p. 36-43, 2017.
- ANDERSON, L.O. et al. Remote sensing detection of droughts in amazonian forest canopies. **New Phytologist**, v. 187, p. 733-750, 2010.
- ANDERSON, L. O. et al. Fraction images for monitoring intra-annual phenology of different vegetation physiognomies in Amazonian. **International Journal of Remote Sensing**, v.32, n.1/2, p.387-408, Jan. 2011.
- ARAGÃO, L. E. O. C. et al. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophysical Research Letters**, v.34, p.1-5, 2007.
- ASNER, G. P. et al. Drought stress and carbon uptake in an Amazon forest measured with spaceborne imaging spectroscopy. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.101, p.6039–6044, 2004.
- AZEVEDO, G. B. **Composição, estrutura e diversidade em floresta ombrófila na Reserva Biológica do Jaru-RO**. 2014. 102 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2014.
- BARROS, F. V. **Hydraulic functioning and drought vulnerability of two tropical forests**. 2017. 146 p. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- 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, p.393–405, 2012.
- BARTLETT, M. K. et al. Global analysis of plasticity in turgor loss point, a key drought tolerance trait. **Ecology Letters**, v.17, p.1580–1590, 2014.
- BERTANI, G. et al. Chlorophyll fluorescence data reveals climate-related photosynthesis seasonality in Amazonian forests. **Remote Sensing**, v.9, p.1275, 2017.
- BI, J. et al. Sunlight mediated seasonality in canopy structure and photosynthetic activity of amazonian rainforests. **Environmental Research Letters**, v.10, n.6, p.64014, jun. 2015.
- BI, J. et al. Amazon Forests' response to droughts: a perspective from the MAIAC Product. **Remote Sensing**, v.8, p.356, 2016.

BORMA, L. S.; NOBRE, C. A. **Secas na Amazônia causas e consequências**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

BRANDO, P. M. et al. Drought effects on litterfall, wood production and belowground carbon cycling in an Amazon forest: results of a throughfall reduction experiment. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v.363, n.1498, p.1839–1848, 2008.

BRANDO, P. M. et al. Fire-induced tree mortality in a neotropical forest: the roles of bark traits, tree size, wood density and fire behavior. **Global Change Biology**, v.18, p.630–641, 2012.

BRAUNING, A. et al. Climatic control of radial growth of *Cedrela montana* in a humid mountain rainforest in southern Ecuador. **Erdkunde**, v.63, p.337–345, 2009.

BRUNO, R D. et al. Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. **Hydrological Processes**, v.20, p.2477–2489, 2006.

CAVALCANTI, I. F.A. et al. Características atmosféricas e oceânicas e manos de seca. In: BORMA, L. S.; NOBRE, C. A. (Eds.). **Secas na Amazônia causas e consequências**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

CHAN, T. et al. Separating water-potential induced swelling and shrinking from measured radial stem variations reveals a cambial growth and osmotic concentration signal. **Plant, Cell and Environment**, v.39, p.233–244, 2016.

CHEN, M. et al. Global land precipitation: a 50-yr monthly analysis based on gauge observations. **Journal of Hydrometeorology**, v.3, p.249-266, 2002.

CHOAT, B. et al. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. **Nature**, v.491, Nov. 2012.

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, p.33–50, 2014.

CLARK, N. A.; WYNNE, R. H.; SCHMOLDT, D. L. A review of past research on dendrometers. **Forest Science**, v.46, n.4, 2000.

CLIMATE PREDICTION CENTER - CPC. **Cold & warm episodes by season**. 2018. Disponível em:
http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em: 01 jun. 2018.

COELHO, C. A. S. et al. As secas de 1998, 2005 e 2010: análise climatológica. In: BORMA, L. S.; NOBRE, C. A. (Eds.). **Secas na Amazônia causas e consequências**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

CORRIDA, S.; MU, Q.; ZHAO, M. **MOD16A2 MODIS / Terra evapotranspiração líquida 8 dias L4 Global 500m rede SIN V006**. Washington; NASA EOSDIS Land Processos DAAC, 2017. [Conjunto de dados].

COSTA, M. H.; FOLEY, J. A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentrations on the climate of Amazonia. **Journal of Climate**, v.13, p.18–34, 2000.

COX, P.M. et al. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. **Theoretical and Applied Climatology**, v.78, p.137-156, 2004.

DA COSTA, A. C. L et al. Effect of 7 yr of experimental drought on vegetation dynamics and biomass storage of an eastern Amazonian rainforest. **New Phytologist**, v.187, p.579–591, 2010.

DA ROCHA, H. R. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, 2009.

DAN, L. et al. Floristic and phytosociology in dense “terra firme” rainforest in the Belo Monte Hydroelectric Plant influence area, Pará, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 75, n. 3, p.S257-S276, 2015.

DALAGNOL, R. et al. Life cycle of bamboo in southwestern Amazon and its relation to fire events. **Biogeosciences Discuss**, 2018.

DEFELIPO, B. V.; RIBEIRO, A. C. **Análise química do solo (metodologia)**. 2. ed. Viçosa: UFV, 1997. 26p. (Boletim Extensão, 29).

DOUGHTY, C. E. et al. Allocation trade-offs dominate the response of tropical forest growth to seasonal and interannual drought. **Ecology**, v.95, n.8, p.2192–2201, 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. – EMBRAPA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006.

ERFANIAN, A.; WANG, G.; FOMENKO, L. Unprecedented drought over tropical South America in 2016: significantly under-predicted by tropical SST. **Scientific Reports**, v.7, p.5811, 2017.

FAN, Y.; MIGUEZ-MACHO, G. Potential groundwater contribution to Amazon evapotranspiration. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.14, p.2039–2056, 2010.

FEARNSIDE, P. M. A. Vulnerabilidade da floresta amazônica perante as mudanças climáticas. **Oecologia Brasiliensis**, v.13, n.4, p.609-618, dez. 2009.

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**, v.65, p.141–149, 2004.

FIGUEIRA, A. et al. **LBA-ECO CD-04 Dendrometry, km 83 Tower Site, Tapajos National Forest, Brazil**. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, 2011. Disponível em: <http://daac.ornl.gov>.

FISHER, R. A. et al. The response of an Eastern Amazonian rain forest to drought stress: results and modelling analyses from a throughfall exclusion experiment. **Global Change Biology**, v.13, p. 2361–2378, 2007.

FOTOPOULOS, I. G. **Fitossociologia de um trecho da floresta de terra firme na Amazônia Ocidental – Terra Indígena Nove de Janeiro/AM, Brasil**. 2006. 57 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional) - Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, 2006.

FREIRE, G. A. P. **Dinâmica sazonal de serapilheira em uma área de floresta de terra firme, Amazônia Ocidental**. 2017. 45 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Rondônia, Ji-Paraná, 2017.

GALVÃO, L. S.; DOS SANTOS, J. R.; ROBERTS, D. A.; BREUNIG, F. M.; TOOMEY, M.; MOURA, Y. M. On intra-annual EVI variability in the dry season of tropical forest: a case study with MODIS and hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v.115, n.9, p.2350–2359, 2011.

GALVÃO, L.S. et al. View-illumination effects on hyperspectral vegetation indices in the Amazonian tropical forest. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.21, n.1, p.291–300, 2013.

GLOOR, M. et al. Recent Amazon climate as background for possible ongoing and future changes of Amazon humid forests. **Global Biogeochemistry Cycles**, v.29, p.1384–1399, 2015.

HOMEIER, J. et al. Tree diversity, forest structure and productivity along altitudinal and topographical gradients in a species-rich Ecuadorian montane, **Biotropica**, v.42, p.140–148, 2010.

GUAN, K. et al. Photosynthetic seasonality of global tropical forests constrained by hydroclimate. **Nature Geoscience**, v.8, n.4, p.284–289, 9 mar. 2015.

GUTTMAN, G. B. Comparing the palmer drought index and the "standardized precipitation index". **Journal of the American Water Resources**, v.16, n.2, p. 113–121, 1998.

HILEL, D. Soil-water and soil-energy balances in the field. In: _____ (Ed.). **Soil in the Environment**. 2008. p. 121–133. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348536-6.50014-9>. Acesso em: 20 jun. 2018.

HILKER, T. et al. Remote sensing of photosynthetic light-use efficiency across two forested biomes: spatial scaling. **Remote Sensing of Environment**, v.114, p.2863–2874, 2010.

HILKER, T. et al. Remote sensing of tropical ecosystems: atmospheric correction and cloud masking matter. **Remote Sensing of Environment**, v. 127, p. 370–384, dez. 2012.

HILKER, T. et al. Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 45, p. 16041–16046, out. 2014.

HILKER, T. et al. Vegetation chlorophyll estimates in the Amazon from multi-angle MODIS observations and canopy reflectance model. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.58, p.278-287, 2017.

HUETE, A. R. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v.83, n.1/2, p.195–213, 2002.

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

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC-SREX. **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation**: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2012. Disponível em: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_Full_Report.pdf. Acesso em: 06 abr. 2018.

IRVINE, J.; GRACE, J. Continuous measurement of water tensions in the xylem of trees based on the elastic properties of wood. **Planta**, v.202, p.455-446, 1997.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.

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, p.33130, 2016.

JONES, M. O.; KIMBALL, J. S.; NEMANI, R. R. Asynchronous Amazon forest canopy phenology indicates adaptation to both water and light availability. **Environmental Research Letters**, v.9, n.124021, p.1-10, 2014.

KHANNA, J. et al. Regional dry-season climate changes due to three decades of Amazonian deforestation. **Nature Climate Change**, v.7, p.200-204, 2017.

KEYANTASH, J.; DRACUP, J. A. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. **Bulletin of the American Meteorology Society**, v. 83, n.8, p.1167-1180, 2004.

- KONINGS, A. G.; GENTINE, P. Global variations in ecosystem-scale isohydricity. **Global Change Biology**, p.1-16, 2016.
- KREPKOWSKI, J. et al. Cambial growth dynamics and climatic control of different tree life forms in tropical mountain forest in Ethiopia. **Trees**, v.25, p.59-70, 2011.
- KUMAGAI, T.; PORPORATO, A. Strategies of a Bornean tropical rainforest water use as a function of rainfall regime: isohydric or anisohydric? **Plant Cell and Environment**, v.35, p.61–71, 2012.
- KURSAR, T. A. et al. Tolerance to low leaf water status of tropical tree seedlings is related to drought performance and distribution. **Functional Ecology**, v.23, p.93–102, 2009.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima Artes e Textos, 2000.
- LEWIS, S. L. et al. The 2010 Amazon drought. **Science**, v.331, p.554, 2011.
- LEVY, R. C. et al. Second generation algorithm for retrieving aerosol properties over land from MODIS spectral reflectance. **Journal of Geophysical Research**, v.112, 2007.
- LI, W.; FU, R.; NÉGRON-JUÁREZ, R. I.; FERNANDES, K. Observed change of the standardized precipitation index, its potential cause and implications to future climate change in the Amazon region. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v.363, p.1767–1772, 2008.
- LI, X.; XIAO, J.; HE, B. Chlorophyll fluorescence observed by OCO-2 is strongly related to gross primary productivity estimated from flux towers in temperate forests, **Remote Sensing of Environment**, v.204, p.659-671, 2017.
- 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, p.189–207, 2008.
- LOPES, A. P. et al. Leaf flush drives dry season green-up of the Central Amazon. **Remote Sensing of Environment**, v.182, p.90–98, 2016.
- LPDAAC, LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER. **MOD16A2**: MODIS / evapotranspiração líquida Terra 8 dias L4 global 500m rede SIN V006. 2018. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov>. Acesso em: 04 abr. 2018.
- LU, X. et al. Comparison of phenology estimated from reflectance-based indices and solar-induced chlorophyll fluorescence (sif) observations in a temperate forest using GPP-based phenology as the standard. **Remote Sensing**, v.10, p.932, 2018.
- LUSS, K. A et al. Tundra photosynthesis captured by satellite-observed solar-induced chlorophyll fluorescence. **Geophysical Research Letters**, v.44, 2017.

- LYAPUSTIN, A.; WANG, Y.; FREY, R. An automatic cloud mask algorithm based on time series of MODIS measurements. **Journal of Geophysical Research**, v.113, D16207, 2008.
- LYAPUSTIN, A. et al. Multi-angle implementation of atmospheric correction (MAIAC): part 1. radiative transfer basis and look-up tables. **Journal of Geophysical Research**, v.116, n.D03210, 2011a.
- LYAPUSTIN, A. et al. Multi-angle implementation of atmospheric correction (MAIAC): part 2. aerosol algorithm. **Journal of Geophysical Research**, v.116, n.D03211, 2011b.
- LYAPUSTIN, A.I. et al. Multi-angle implementation of atmospheric correction for MODIS (MAIAC). Part 3: atmospheric correction. **Remote Sensing of Environment**, v.127, p.385–393, 2012.
- MACBEAN, N. et al. Strong constraint on modelled global carbon uptake using solar induced chlorophyll fluorescence data. **Scientific Reports**, v.8, p.1973, 2018.
- MACHADO, C. B. **Análise fenológica do dossel da floresta nacional do tapajós utilizando dados orbitais do sensor MODIS e hiperespectrais locais**. 2017. 149p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2017.
- MAEDA, E. E. et al. Can MODIS EVI monitor ecosystem productivity in the Amazon rainforest? **Geophysical Research Letters**, v.41, p.7176–7183, 2014.
- MALHI, Y. et al. Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. 45-1 – 45-17, 2002.
- MALHI, Y. et al. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. **Global Change Biology**, v.12, p.1107–1138, 2006.
- MALHI, Y. et al. **Produção, estoques e fluxo de carbono nas florestas Amazônicas**. [S.l.]: AGC, 2009. (Geophysical Monograph Series, 186).
- MARENGO, J. A. Characteristics and spatio-temporal variability of the amazon river basin water budget. **Climate Dynamics**, v.24, n.1, p.11–22, 2005.
- MARENGO, J. A. The drought of Amazonia in 2005. **American Meteorological Society**, p. 1-22, feb. 2007.
- MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; TOMASELLA, J. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21, p. 495–516, 2008.
- MARENGO, J.A. et al. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, L12703, 2011.
- MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v.36, p.1033–1050, 2016.

- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY. 8., 1993. Proceedings... Boston: **American Meteorological Society**, 1993. p.179–184.
- MCDOWELL, N.; POCKMAN, W. T.; ALLEN, C. D. et al. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? **New Phytologist**, v.178, p.719–739, 2008.
- MCDOWELL, N. G. et al. The interdependence of mechanisms underlying climate-driven vegetation mortality. **Trends in Ecology & Evolution**, v.26, n.10, p.523-532, 2011.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. Drought monitoring with multiple time scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY. 9., 1995. **Proceedings...** Boston: American Meteorological Society, 1995. p. 233–236.
- MENCUCCINI, M. et al. Concurrent measurements of change in the bark and xylem diameters of trees reveal a phloem-generated turgor signal. **New Phytologist**, v.198, p.1143–1154, 2013.
- MENDIVELSO, H. A. et al. Differential growth responses to water balance of coexisting deciduous tree species are linked to wood density in a bolivian tropical dry forest. **PLoS ONE**, v.8, 2013.
- METCALFE, D. B. et al. The effects of water availability on root growth and morphology in an Amazon rainforest. **Plant Soil**, v.311, p.189–199. 2008.
- MICHILES, A. A. S. **Taxas de armazenamento térmico na biomassa e balanço de energia em superfície para áreas de floresta de terra firme na Amazônia**. 2009. 185 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
- MORTON, D. C. et al. Amazon forests maintain consistent canopy structure and greenness during the dry season. **Nature**, v. 506, 13 Feb. 2014.
- MOURA, Y.M. et al. Seasonality and drought effects of Amazonian forests observed from multi-angle satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v.171, p.278–290, 2012.
- MOURA, Y. M. et al. Seasonality and drought effects of Amazonian forests observed from multi-angle satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v.171, p.278–290, 2015.
- MOURA, Y. et al. Spectral analysis of amazon canopy phenology during the dry season using a tower hyperspectral camera and MODIS observations. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.131, p.52–64, 2017.
- MULER, R. A. S; MOURA, V.; BORMA, L. S. Distribuição espaço-temporal da precipitação e SPI no estado de Rondônia (RO) por meio de técnicas de geoestatística. **Revista Geográfica Venezuelana**, 2018. artigo aceito.

- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. **Standardized Precipitation Index (SPI)**. 2018. Disponível em: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/subseasonal/atlas/SPI-html/SPI-description.html>. Acesso em: 10 dez. 2017.
- NEPSTAD, D. C.; MOUTINHO, P.; MARKEWITZ, D. The recovery of biomass, nutrient stocks, and deep soil function in secondary forests. In: McCLAIN, M.; VICTORIA, R.; RICHEY, R. (Eds.). **The biogeochemistry of the Amazon basin and its role in a changing world**. Oxford: Oxford University Press, 2001. p. 139–155.
- NEPSTAD, D. C. et al. The effects of rainfall exclusion on canopy processes and biogeochemistry of an Amazon forest. **Journal of Geophysical Research**, v.107, p.1–18, 2002.
- NEPSTAD, D. Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis. **Global Change Biology**, v.10, p.704–717, 2004.
- NEPSTAD, D. C. et al. Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest. **Ecology**, v.88, n.9, p.2259–2269, 2007.
- NEPSTAD, D.; MOUTINHO, P. **LBA-ECO LC-14 biophysical measurements, rainfall exclusion, Tapajos National Forest**. 2013. Disponível em: <http://daac.ornl.gov>. Acesso em: 20 abr. 2018.
- NOBRE, C.A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and global climate change. **Journal of Climate**, v. 4, Oct. 1991.
- OFFENTHALER, I.; HIETZ, P.; RICHTER, H. Wood diameter indicates diurnal and long-term patterns of xylem water potential in Norway spruce. **Trees**, v.15, p.215–221, 2001.
- OLIVEIRA, R. S. et al. Hydraulic redistribution in three Amazonian trees. **Oecologia** v.145, p.354–363. 2005.
- PAGANO, S. N. Produção de folheto em mata mesófila semidecídua no município de Rio Claro, SP. **Revista Brasileira de Biologia**, São Carlos, v. 49, n. 3, p. 633-639, 1989.
- PEREIRA, L. et al. Plant pneumatics: stem air flow is related to embolism – new perspectives on methods in plant hydraulics. **New Phytologist**, p.1-14, 2016.
- PHILLIPS, O. L. et al. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. **Science**, v.323, p.1344-1347, 2009.
- PHILLIPS, O. L. et al. Drought–mortality relationships for tropical forests. **New Phytologist**, v.187, p.631–646, 2010.
- PLAUT, J. A. et al. Hydraulic limits preceding mortality in piñon-juniper woodland under experimental drought. **Plant, Cell and Environment**, v.35, n.9, p.1601-17, 2012.

PLAUT, J. A. et al. Reduced transpiration response to precipitation pulses precedes mortality in a piñon – juniper woodland subject to prolonged drought. **New Phytologist**, v.200, n.2, p.375-87, 2013.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

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, p.128–144, 2013.

RESTREPO-COUBE, N. et al. Do dynamic global vegetation models capture the seasonality of carbon fluxes in the Amazon basin? a data-model intercomparison. **Global Change Biology**, p.1-19, 2016.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.H. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: CFSEMG/UFV, 1999. 359 p.

RICHARDSON, A. D. et al. Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest. **Oecologia**, v.152, n.2, p.323–334, 2007.

RICHTER, H. Water relations of plants in the field: some comments on the measurement of selected parameters. **Journal of Experimental Botany**, v.48, p.1–7, 1997.

RODERSTEIN, M.; HERTEL, D.; LEUSCHNER, C. Above- and belowground litter production in three tropical montane forests in southern Ecuador. **Journal of Tropical Ecology**, v.21, p.483–492, 2005.

ROCHA, H. R. et al. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical Forest in eastern Amazônia. **Ecological Applications**, v.14, p.S22-S32, 2004.

ROWLAND, L. et al. Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. **Nature**, p. 1-13, 2015.

SAATCHI, S. 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.

SACK, L.; PASQUET-KOK, J. **Leaf pressure-volume curve parameters**. 2011. Disponível Em: prometheuswiki.org/tiki-index.php?page=Leaf%20pressure-volume%20curve%20parameters. Acesso em: 10 nov. 2017.

SALESKA, S. R. et al. Amazon forests green-up during 2005 drought. **Science**, v.318, p.612-612, 2007.

SAMANTA, A. et al. Amazon forests did not green-up during the 2005 drought. **Geophysical Research Letters**, v.37, p.1-5, 2010a.

SAMANTA, A.; GANGULY, S.; MYNENI, R. B. MODIS Enhanced Vegetation Index data do not show greening of Amazon forests during the 2005 drought. **New Phytologist**, v.189, p.11–15. 2010b.

SAMANTA, A. et al. Seasonal changes in leaf area of Amazon forests from leaf flushing and abscission. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, 2012.

SEVANTO, S. et al. How do trees die? a test of the hydraulic failure and carbon starvation hypotheses. **Plant, Cell and Environment**, v.37, p.153-161, 2013.

SHI, H. et al. Assessing the ability of MODIS EVI to estimate terrestrial ecosystem gross primary production of multiple land cover types. **Ecological Indicators**, v.72, p.153–164, 2017.

SHUTTLEWORTH, W. Evaporation from Amazonian rainforest. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences**, v.233, p.321-346, 1988.

SOMBROEK, W. Spatial and temporal patterns of Amazon rainfall. **Ambio**, v. 30, n. 7, Nov. 2001.

TARDIEU, F; SIMONNEAU, T. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. **Journal of Experimental Botany**, v.49, p.419-432, 1998.

TAVARES, I. B. **Fluxos de água e energia na interface solo-planta-atmosfera e principais condicionantes da evapotranspiração na Amazônia**. 2015. 28 p. Proposta de Tese (Doutorado em Ciências do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

TEODORO, G. S. **Efeitos de secas extremas na fenologia, crescimento e desempenho ecofisiológico de espécies nativas de campo rupestre**. 2014. 127 p. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

TOLEDO, M. Climate is a stronger driver of tree and forest growth rates than soil and disturbance. **Journal of Ecology**, v.99, p.254–264, 2011.

TYREE, M.T.; HAMMEL, H.T. Measurement of turgor pressure and water relations of plants by pressure bomb technique. **Journal of Experimental Botany**, v.23, p.267, 1972.

VAN EMMERIK, T. et al. Water stress detection in the Amazon using radar. **Geophysical Research Letters**, v.51, 2017.

VIEIRA, S. et al. Forest structure and carbon dynamics in Amazonian tropical rain forests, **Oecologia**, v.140, p.468–479, 2004.

VON RANDOWN, C. 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, p.5–26. 2004.

- YANG, J. et al. Amazon droughts and forest responses: largely reduced forest photosynthesis but slightly increased canopy greenness during the extreme drought of 2015/2016. **Global Change Biology**, v.24, p.1919-1934, 2018.
- ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. **Science**, v.329, p.940, 2010.
- ZWEIFEL, R.; ITEM, H.; HÄSLER, R. Stem radius changes and their relation to stored water in stems of young norway spruce trees. **Trees**, v.15, p.50-57, 2000.
- ZWEIFEL, R.; ITEM, H.; HÄSLER, R. Link between diurnal stem radius changes and tree water relations. **Tree Physiology**, v.21, p.869-877, 2001.
- ZWEIFEL, R.; ZIMMERMANN, L.; NEWBERY, D. M. Modelling tree water deficit from microclimate: an approach to quantifying drought stress. **Tree Physiology**, v.25, p.147-156, 2005.
- ZWEIFEL, R. Radial stem variations: a source of tree physiological information not fully exploited yet. **Plant, Cell and Environment**, p.1-2, 2015.
- WAGNER, F. H. et al. Water availability is the main climate driver of neotropical tree growth. **PLoS ONE**, v.7, p.1-11, Apr. 2012.
- WAGNER, F. H. Asynchronism in leaf and wood production in tropical forests: a study combining satellite and ground-based measurements. **Biogeosciences**, v.10, p.7307-7321, 2013.
- WAGNER, F. H. et al. Pan-tropical analysis of climate effects on seasonal tree growth. **PLoS ONE**, v.9, p.1-15, Mar. 2014.
- WAGNER, F. H. et al. Climate seasonality limits leaf carbon assimilation and wood productivity in tropical forests. **Biogeosciences**, v.13, p.2537-2562, 2016.
- WAGNER, F. H. et al. Climate drivers of the Amazon forest greening, **PLoS ONE**, v.12, p.1-15, 2017.
- WEST, A.G. et al. Transpiration and hydraulic strategies in a pi~non-juniper woodland. **Ecological Applications**, v.18, p.911-927, 2008.
- WILLIAMSON, G. B. et al. Amazonian tree mortality during the 1997 El Niño drought. **Conservation Biology**, v.14, n.5, p.1538-1542, Oct. 2000.
- WOEBBECKE, D. M. et al. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. **Transactions of ASAE**, v.38, n.1, p.259-269, 1995.
- WRIGHT, S.J. Plant diversity in tropical forests: a review of mechanisms of species coexistence. **Oecologia**, v.130, p.1-14, 2002.
- WU, J. et al. Leaf development and demography explain photosynthetic seasonality in Amazon evergreen forests. **Forest Ecology**, v.351, 2016.

WU, J. et al. Biological processes dominate seasonality of remotely sensed canopy greenness in an Amazon evergreen forest. **New Phytologist**, v.217, p.1507–1520, 2018.

APÊNDICE A – TABELA DAS COORDENADAS E PARÂMETROS DO GEORREFERENCIAMENTO

Tabela A.1 - Coordenadas Geográficas na projeção SIRGAS2000. Horz RMS = erro horizontal; Vert RMS = erro vertical; M1, M2, M3 e M4 representam os limites da sub-parcela permanente (SPP); L1, L2, L3, e L4 representam coletores de serapilheira; * coordenadas obtidas com GPS comum, sem pós-processamento.

ID	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Horz RMS (m)	Vert RMS (m)
A3	10°11'11,79394"S	61°52'21,06979"W	141,759	0,339	0,358
A20	10°11'12,98778"S	61°52'22,14142"W	161,923	0,130	0,755
A24	10°11'12,55400"S	61°52'21,80664"W	152,318	0,652	0,572
A27	10°11'12,38957"S	61°52'21,82900"W	-	-	-
A29	10°11'12,38957"S	61°52'21,60047"W	149,499	0,655	0,604
A31	10°11'12,39334"S	61°52'21,93828"W	133,699	0,781	0,534
A32	10°11'11,98735"S	61°52'21,52327"W	153,358	0,708	0,804
A36	10°11'11,82786"S	61°52'21,35628"W	147,656	0,427	0,993
A102	10°11'14,73937"S	61°52'20,57451"W	150,761	0,880	0,478
A137	10°11'10,98154"S	61°52'20,34194"W	178,520	0,807	0,464
A144	10°11'10,61612"S	61°52'20,87067"W	150,372	0,859	0,429
A147*	10°11'10,66400"S	61°52'21,31000"W	-	-	-
A151*	10°11'10,73100"S	61°52'21,96700"W	-	-	-
A152	10°11'11,27167"S	61°52'21,73442"W	151,084	0,419	0,966
A161	10°11'09,90631"S	61°52'23,22248"W	167,440	0,279	0,646
A167	10°11'10,04580"S	61°52'19,68101"W	158,890	0,837	0,364
A168	10°11'10,33743"S	61°52'19,69736"W	153,793	0,579	0,899
A177	10°11'10,24130"S	61°52'20,66124"W	158,325	0,318	0,443
A180	10°11'09,79257"S	61°52'21,09666"W	141,493	0,248	0,125
A182	10°11'09,91474"S	61°52'21,15875"W	147,289	0,258	0,137
A183	10°11'09,93417"S	61°52'21,72696"W	159,197	0,331	0,244
A254	10°11'10,00869"S	61°52'21,79517"W	158,182	0,655	0,434
A284	10°11'09,87692"S	61°52'24,34037"W	136,178	0,729	0,006
A286	10°11'10,20012"S	61°52'24,31242"W	162,415	0,186	0,560
A288*	10°11'10,21800"S	61°52'23,97300"W	-	-	-
A328	10°11'10,58924"S	61°52'25,04557"W	153,030	0,198	0,063
A379*	10°11'10,13900"S	61°52'20,03000"W	-	-	-
A380	10°11'10,05661"S	61°52'20,02958"W	152,154	0,728	0,258
A381	10°11'14,03385"S	61°52'21,56451"W	151,554	1,848	0,935
A382	10°11'14,41947"S	61°52'20,26441"W	151,435	0,876	0,730
A498	10°11'09,80907"S	61°52'25,20766"W	151,521	0,041	0,745
Torre LBA	10°11'11,39453"S	61°52'20,89336"W	152,191	0,168	0,133
M1	10°11'08,90310"S	61°52'21,85085"W	148,556	0,955	0,728
M2	10°11'11,75680"S	61°52'23,28101"W	152,733	0,243	0,830
M3	10°11'10,31187"S	61°52'26,28476"W	153,980	0,258	0,043
M4	10°11'07,38949"S	61°52'24,80315"W	150,405	0,748	0,947
L1*	10°11'10,02000"S	61°52'19,92000"W	-	-	-
L2*	10°11'10,62000"S	61°52'20,88000"W	-	-	-
L3*	10°11'11,64000"S	61°52'21,48000"W	-	-	-
L4*	10°11'12,90000"S	61°52'21,90000"W	-	-	-
Piezômetro (PZ/P1)	10°11'10,03000"S	61°52'21,36568"W	157,071	0,673	0,534
P2	10°11'10,90482"S	61°52'23,10007"W	145,472	0,961	0,393
P3	10°11'8,796000"S	61°52'23,00300"W	-	-	-
Margem do rio	10°11'45,27807"S	61°52'41,67192"W	125,458	0,406	0,420

Trabalho de campo realizado com Msc. Valdir Moura em 21 de abril de 2017.

Fonte: Produção da autora.

APÊNDICE B – TABELA DE CRESCIMENTO POR PERÍODO SAZONAL E DIÂMETRO

Tabela B.1 - Análise descritiva do crescimento por período sazonal, sítio RJA. Valores em cm; σ = desvio padrão.

Classe de diâmetro	Altura min/max	Período chuvoso 2015/2016		Período seco PS 2016		Período chuvoso PC 2016/2017	
		Média	σ	Média	σ	Média	σ
DAP 10-20 cm	12-15 m	0.106	0.152	0.020	0.026	0.018	0.035
DAP 20-30 cm	12-20 m	0.161	0.109	0.027	0.032	0.089	0.129
DAP 30-40 cm	16-35 m	0.121	0.082	0.101	0.132	0.127	0.114
DAP > 40 cm	19-39 m	0.190	0.184	0.026	0.031	0.063	0.102
Média de todos DAPs		0.151	0.137	0.045	0.076	0.077	0.104

Fonte: Produção da autora.

APÊNDICE C – TABELA DOS TRAÇOS ECOFISIOLÓGICOS POR ESPÉCIE

Tabela C.1 - Traços ecofisiológicos. Ψ_{PD} = *Predawn* (MPa); Ψ_{MD} = *Midday* (MPa); P_{50} (MPa); S = período seco; CH = período chuvoso; I = comportamento isohídrico; A = comportamento anisohídrico.

Espécies (ID)	DAP (cm)	Ψ_{TLP}	P_{50}	Ψ_{PD}	Ψ_{PD}	Ψ_{MD}	Ψ_{MD}	Isohidria	
				S	CH	S	CH	S	CH
<i>Anamalocalyx uleanus</i> (382)	10-20	-2.26 ± 0.37	-0,99	-0,46	-0,50	-0,22	-0,97	A	I
<i>Sagotia brachysepala</i> (380)		-2.10 ± 0.27	-0,84	-0,41	-0,38	-0,21	-0,41	A	I
<i>Virola michelii</i> (381)		-2.55 ± 0.24	-2,69	-0,45	-0,72	-0,64	-0,53	I	I
<i>Licania hypoleuca</i> (288)		-1.08	-	-	-	-	-	-	-
<i>Tachigali chrysophylla</i> (177)		-	-	-	-0,36	-	-1,35	-	I
<i>Licania sprucei</i> (284)		-3.10 ± 0,86	-	-0,48	-0,41	-2,35	-1,34	A	-
<i>Copaifera multijuga</i> (31)	20-30	-1.37 ± 0.01	-2,40	-0,51	-0,48	-2,40	-2,53	A	A
<i>Eschweilera coriacea</i> (161)		-1.73 ± 0.25	-	-0,24	-0,26	-0,98	-1,62	A	A
<i>Pouteria durlandii</i> (32)		-2.91 ± 0.03	-	-0,47	-0,64	-1,91	-1,49	A	A
<i>Pouteria egleri</i> (137)		-1.10	-3,16	-	-0,85	-1,17	-1,51	I	A
<i>Tachigali chrysophylla</i> (29)		-1.21	-	-	-	-	-	-	-
<i>Minuartia guianensis</i> (27)	30-40	-0.944	-	-	-	-	-	-	-
<i>Minuartia guianensis</i> (167)		-1.34	-3,99	-0,41	-0,33	-0,43	-1,80	I	A
<i>Tetragastris altissima</i> (168)		-2.02 ± 0.24	-3,93	-	-0,51	-	-2,10	-	A
<i>Cariniana decandra</i> (286)		-2.19 ± 0.70	-4,72	-0,40	-0,61	-1,27	-1,74	A	A
<i>Dipteryx odorata</i> (183)		-1.94 ± 0.57	-5,08	-0,52	-0,56	-2,56	-2,70	A	A
<i>Licania sprucei</i> (498)		-2.48 ± 0.44	-	-	-	-	-	-	-
<i>Astronium lecointei</i> (254)	> 40	-	-4,71	-	-0,43	-	-1,65	-	A
<i>Swartzia ingifolia</i> (102)		-1.47 ± 0.56	-	-0,45	-	-0,47	-	I	-
<i>Protium tenuifolium</i> (152)		-1.15	-	-	-0,26	-	-1,63	-	A
<i>Dialium guianense</i> (24)		-2.37	-	-0,48	-0,59	-1,37	-2,44	A	A
<i>Astronium lecointei</i> (36)		-2.08 ± 0.58	-	-0,63	-	-1,03	-	A	-
<i>Dipteryx magnifica</i> (328)		-1.94	-	-0,37	-	-0,59	-	A	-
<i>Macrolobium suaveolens</i> (20)		-1.23 ± 0.14	-	-0,37	-0,45	-1,57	-2,25	A	A
Média ROI			-1,87 ± 0,63	-3,25 ± 1,51	-0,44 ± 0,09	-0,49 ± 0,16	-1,20 ± 0,78	-1,65 ± 0,64	A

Fonte: Produção da autora.

APÊNDICE D – TABELA DAS RELAÇÕES ENTRE POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR DIÁRIO E VARIÁVEIS CLIMÁTICAS

Tabela D.1 - Tabela das correlações entre potencial hídrico foliar diário e variáveis climáticas diárias, sítio RJA. T = temperatura, UR = umidade relativa do ar; R_n = radiação líquida.

	Hora	a382	a381	a380	a167	a137	a102	a36	a31	a32	a24	a20	a328	a286	a284	a183	a161	a254	a168	a152	a177
R ² (P. seco)	T	0.929	0.069	0.879	0.078	0.208	0.134	0.254	0.940	0.890	0.643	0.686	0.538	0.537	0.427	0.761	0.834	-	-	-	-
	UR	0.690	0.318	0.832	0.177	0.421	0.109	0.085	0.739	0.707	0.308	0.465	0.433	0.499	0.419	0.761	0.882	-	-	-	-
	R _n	0.671	0.020	0.576	0.067	0.164	0.063	0.555	0.794	0.864	0.921	0.826	0.628	0.507	0.517	0.541	0.171	-	-	-	-
R ² (P. chuvoso)	T	0.418	0.212	0.138	0.727	0.748	-	-	0.839	0.888	0.690	0.728	-	0.589	0.747	0.620	0.813	0.872	0.710	0.782	0.414
	UR	0.322	0.164	0.117	0.477	0.685	-	-	0.794	0.931	0.635	0.744	-	0.511	0.645	0.604	0.424	0.616	0.632	0.727	0.158
	R _n	0.363	0.222	0.002	0.247	0.331	-	-	0.652	0.330	0.009	0.013	-	0.356	0.505	0.153	0.143	0.194	0.331	0.041	0.000

Fonte: Produção da autora.

APÊNDICE E - CURVA DIÁRIA POR ESPÉCIE, SÍTIO RJA

