

BRUNA DE COSTA ALBERTON

**MONITORAMENTO DA FENOLOGIA FOLIAR PARA O ACESSO DAS DINÂMICAS
ESPAÇO-TEMPORAIS DA PRODUTIVIDADE DE ECOSISTEMAS TROPICAIS**

Relatório de Pós-doutorado realizado na
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências, Rio Claro

Supervisor: Leonor Patrícia Cerdeira Morellato

CAPES-PRINT - 88887.512218/2020-00

Rio Claro
2025

1. RESUMO

Os processos ecossistêmicos como a produtividade primária, as trocas de carbono e água entre superfície e atmosfera, a ciclagem de nutrientes, entre outros, são basicamente controlados pela sazonalidade na produção de folhas de uma vegetação, sua capacidade fotossintética, e pelos gatilhos ambientais, como água, luz e temperatura, que as influenciam. A fenologia foliar ou vegetativa, é a ciência que monitora os ciclos de vida recorrentes das folhas, do seu brotamento até sua abscisão, e quais fatores influenciam seus acontecimentos, sobretudo o clima. A escassez de séries temporais fenológicas de longa duração para regiões tropicais tem estimulado a busca por novas ferramentas que viabilizem o monitoramento fenológico. O uso das fenocâmeras tem se tornado crescente em estudos fenológicos em todo o mundo e tem demonstrado ser eficiente para o monitoramento de vegetações tropicais. No Brasil, a rede *e-Phenology* é destaque e atualmente conta com mais de 30 câmeras instaladas em diferentes tipos de vegetações tropicais. Com a atual disponibilidade de sensores e métodos para avaliar as dinâmicas da vegetação das quais dispomos, um dos grandes desafios dos estudos em fenologia tem sido justamente entender a fonte das variações dos dados entre diferentes escalas espaciais. A partir disso, os três principais objetivos propostos para este projeto, são: (i) Descrever os padrões da fenologia foliar de vegetações neotropicais (30 sites) monitoradas por fenocâmeras e determinar os principais gatilhos climáticos atuando em suas dinâmicas temporais; (ii) Analisar a dinâmica espaço-temporal das trocas foliares de um mosaico de vegetação dos campos rupestres da Serra do Cipó, MG; e (iii) Investigar a fenologia foliar derivada de diferentes abordagens (fenocâmeras e satélites) e escalas espaço-temporais para uma vegetação altamente heterogênea. Esperamos resolver questões ecológicas referentes as dinâmicas sazonais de vegetações tropicais comparando e integrando diferentes escalas espaciais e temporais de amostragem.

Palavras-chave: trocas foliares, imagens digitais, imagens de satélite, análise multi-escala, vegetações neotropicais

2. ABSTRACT

Ecosystem processes, including primary productivity, carbon and water exchanges, and nutrient cycling, are largely driven by the seasonal leaf production of vegetation, their photosynthetic capacity, and environmental triggers such as precipitation, light, and temperature. Phenology is the science of observing the recurring life cycles of leaves—from leaf flushing to

senescence—and the factors influencing these events, particularly climate. The lack of long-term phenological time series in tropical regions and the challenges of systematic human observations have prompted the development of new tools for efficient temporal and spatial monitoring of leaf phenology in tropical vegetation. The use of phenocameras for monitoring phenology has surged globally and has proven effective for various tropical vegetation types. However, much of the effort has been concentrated on woody, temperate vegetation. In Brazil, the e-Phenology network stands out, featuring over 30 cameras installed in different tropical vegetation types. These methods and sensors, now widely available for assessing seasonal dynamics in vegetation, present a significant challenge in phenology research aimed at understanding variability across spatial scales and identifying triggers at fine temporal scales. Based on this, the three primary goals proposed for this project are: (i) to describe the patterns of leaf phenology in neotropical vegetation (30 sites) monitored by phenocams and determine the primary climatic triggers driving their temporal dynamics; (ii) to analyze the spatial-temporal dynamics of leaf exchanges in tropical grasslands, particularly the vegetation mosaic of the rupestrian grasslands or campo rupestre of the tropical Espinhaço mountain range, MG; and (iii) to investigate leaf phenology patterns derived from phenocams and satellites across different spatial-temporal scales for heterogeneous vegetation. In this study, we aim to address some key ecological questions related to the seasonal dynamics of tropical vegetation by comparing and integrating spatial and temporal scales of leaf phenological dynamics.

3. INTRODUCTION

As florestas tropicais são responsáveis por aproximadamente 50% das taxas fotossintéticas terrestres, alcançando até 55% do carbono global estocado, e assim, contribuindo fortemente para a regulação do clima regional e global (Field *et al.*, 1998, Malhi *et al.*, 2002). A simples estrutura das folhas é a grande responsável por trás disso, já que processos ecossistêmicos como a produtividade primária, as trocas de carbono e água entre superfície e atmosfera, a ciclagem de nutrientes, entre outros, são basicamente controlados pela sazonalidade na quantidade de folhas produzidas em uma vegetação, sua capacidade fotossintética, e pelos gatilhos ambientais que influenciam essas mudanças (Borchert, 1994, Reich, 1995,). Por essas razões, entender as dinâmicas espaciais e temporais da fenologia foliar em vegetações tropicais, juntamente com seus gatilhos ambientais, tem ganhado maior atenção nos últimos anos. Através da fenologia foliar ou

vegetativa são monitorados os ciclos de vida recorrentes das folhas (do brotamento até a senescência), permitindo avaliar quais fatores influenciam esses ciclos, sobretudo o clima (Polgar; Primack 2011, Morellato *et al.*, 2016).

Para os trópicos, a disponibilidade de água e de luz são considerados os principais fatores influenciando a fenologia foliar (Van Schaik; Terborgh; Wright, 1993; Wright; Van Schaik, 1994; Morellato *et al.*, 2000; Rivera *et al.*, 2002; Borchert *et al.*, 2015; Camargo *et al.*, 2018). As nuances de comportamentos fenológicos encontradas em vegetações tropicais seriam primordialmente controladas pela condição hídrica local, regulando a estação de crescimento. Assim, ambientes com longos e intensos períodos de seca propiciariam um comportamento marcadamente sazonal da fenologia vegetativa da comunidade, refletida numa maior proporção de espécies decíduas (Murphy; Lugo, 1986; Reich, 1995, Singh; Singh, 1992, Williams *et al.*, 2008). A medida que tal restrição hídrica se torna menos pronunciada, as espécies podem apresentar diferentes graus de deciduidade e a comunidade passa a responder a uma maior variedade de estímulos, como condições de umidade do solo, topografia (Borchert 1994, Rivera *et al.*, 2002), comprimento do dia (Rivera *et al.*, 2002; Morellato *et al.*, 1989, Singh; Kushwaha, 2005, Higgings *et al.*, 2011; Camargo *et al.*, 2018), e interações bióticas como a herbivoria (Aide, 1992). Abordagens em escalas espaciais globais utilizando dados de satélite, propõem um limiar de 2.000 mm de precipitação anual média como fator limitante da produtividade, distinguindo ecossistemas que respondem a disponibilidade hídrica daqueles que respondem a outros estímulos, como comprimento do dia por exemplo (Guan et al. 2015, Wagner et al. 2016).

A escassez de séries temporais fenológicas de longa duração para regiões tropicais, (Morellato *et al.*, 2016, Abernethy *et al.*, 2018) tem estimulado a busca por novas ferramentas de monitoramento fenológico nos trópicos. O sensoriamento remoto da fenologia por meio de imagens de satélite, tem sido uma ferramenta importante para o estudo em grandes escalas regionais e globais (*Land-surface Remote Phenology*), não alcançadas pelo trabalho de campo tradicional. No entanto, o esforço amostral tem focado na cobertura espacial regional, sumarizando em sua maioria séries mensais e permanecendo a necessidade da validação com dados de solo e de entendimento em escalas espaciais mais refinadas (Smith *et al.*, 2016, Chavana-Bryant, 2017). O uso de câmeras digitais tem se tornado mais frequente em trabalhos ecológicos e tem demonstrado ser eficiente para o monitoramento da fenologia de vegetações tropicais (Alberton *et*

al. 2014, 2017, Nagai *et al.* 2016). Estes sensores, também chamados “fenocâmeras”, apresentam baixo custo, fácil instalação e manutenção, podem cobrir um grande número de áreas com coleta de dados em alta frequência temporal (horário a diário), além do potencial para serem associados a outras escalas espaço-temporais e auxiliar na validação de dados de solo (e.g. Browning *et al.* 2017). A rede *e-Phenology* (www.recod.ic.unicamp.br/ephenology) é destaque no monitoramento de vegetações tropicais, e atualmente conta com mais de 30 câmeras instaladas em diferentes tipos de vegetação no Brasil.

Com a atual disponibilidade de sensores e métodos para avaliar as dinâmicas da vegetação dos quais dispomos, um dos grande desafios dos estudos em fenologia tem sido justamente entender a fonte das variações dos dados entre diferentes escalas espaciais e temporais (Friedl *et al.* 2004, Reed *et al.* 2009). Alguns estudos mais recentes, desenvolvidos em vegetações temperadas, propuseram tal abordagem envolvendo dados de satélite e câmeras (Hufkens *et al.*, 2012, Melaas *et al.*, 2016, Browning *et al.*, 2017, Watson *et al.*, 2019). Parte destes estudos foram realizados em ecossistemas campestres, conhecidos por possuírem alta heterogeneidade espacial, formando mosaicos de vegetações onde fitofisionomias distintas se encontram muito próximas entre si. Um exemplo, é o estudo recente desenvolvido em campos temperados na Austrália, mostrando que embora dados de diferentes escalas espaciais (câmeras e satélite) fossem bastante próximos, o monitoramento por câmeras foi capaz de rastrear mudanças fenológicas dentro de uma janela de 5 dias, não detectadas pelos dados de satélite (Watson *et al.* 2019). A fenologia vegetativa de campos tem sido negligenciada pelos métodos de observação direta devido as dificuldades inerentes desse monitoramento, no entanto tem ganhado contribuições com o uso de sensores remotos próximos como as fenocâmeras (Migliavacca *et al.* 2011, Julitta *et al.*, 2014, Inoue *et al.*, 2015, Watson *et al.*, 2019).

A partir do exposto acima, o presente projeto tem os seguintes objetivos:

(i) Padrões sazonais da fenologia foliar de vegetações neotropicais – A alta amplitude climática presente nos trópicos, principalmente relacionada a intensidade da estação seca e distribuição da precipitação, resulta em uma grande variedade de comportamentos fenológicos dentro e entre as vegetações tropicais, o que leva a necessidade de se ampliar temporalmente estes estudos e em diversificar o número de locais amostrados de tal forma que possamos efetivamente ter um maior entendimento da dinâmica foliar das vegetações tropicais (Reich, 1995, Chambers *et al.* 2013, Camargo *et al.* 2018). A disponibilidade de água e luz são considerados os principais

fatores influenciando a sazonalidade da produção de folhas nos trópicos, no entanto a sua forma de ação sobre a dinâmica temporal das vegetações ainda é pouco conhecida. Estudos mais recentes (Guan et al., 2015, Wagner et al., 2016) propuseram um limiar de 2.000 mm de precipitação anual média para distinguir ecossistemas de produtividade limitada pela disponibilidade hídrica daqueles não limitados e, portanto, influenciados por outros fatores como o comprimento do dia e intensidade da radiação solar. Por outro lado, é possível que em ambientes tropicais, a alta diversidade de espécies e suas adaptações permitam-nas “escapar” de condições ambientais pouco favoráveis em ecossistemas marcadamente sazonais. Uma análise envolvendo dados ecológicos coletados para cerca de 400 espécies originadas de ecossistemas sazonais mostrou que o comportamento fenológico foliar é imperativo sob a condição fisiológica local, controlando as interações ecofisiológicas das plantas (Vico et al. 2015). É o caso de espécies de cerrado, por exemplo, que são capazes de brotar ainda na estação seca, possuindo adaptações morfológicas como a presença de raízes profundas que permitem o acesso a águas subterrâneas (Vico et al., 2015). Neste sentido, buscamos com este objetivo, responder: como variam os padrões da fenologia foliar espacialmente e temporalmente em vegetações tropicais sob diferentes condições de sazonalidade climática? Existe, de fato, um limiar hídrico que possa ser estabelecido para separar comunidades tropicais sob diferentes condições de sazonalidade? Ou, se a variedade dos comportamentos fenológicos é a principal força responsável nos padrões das dinâmicas temporais ao longo destas comunidades? Pretendemos (i) descrever os padrões da fenologia foliar de diferentes vegetações tropicais amostradas pela rede *e-Phenology*, e; (ii) investigar a influência dos principais gatilhos ambientais sobre o padrão das fenofases foliares ao longo destas vegetações.

(ii) Acessando a resposta fenológica de vegetações tropicais altamente heterogêneas: o mosaico de vegetação dos campos rupestres da Serra do Cipó, MG - Poucos estudos nos trópicos têm se dedicado a investigar os padrões vegetativos e de crescimento de comunidades campestres, sendo a maior parte deles, ainda que raros, dedicados a acompanhar os padrões reprodutivos das comunidades. Um avanço, em particular, promovido com o uso das fenocâmeras é a possibilidade de um monitoramento próximo de campos e pastagens (Migliavacca et al., 2011, Jullitta et al., 2014, Watson; Restrepo-Coupe; Huete, 2019). O campo rupestre é uma das mais diversas e complexas vegetações do Brasil, apresentando grande diversidade de espécies e alto

grau de endemismo em uma paisagem heterogênea de montanha tropical (Silveira et al. 2016, Morellato & Silveira 2018). Entretanto, pouco se sabe sobre a dinâmica espaço-temporal deste mosaico de vegetação, fundamental para seu manejo e preservação e para o entendimento de sua resiliência frente as alterações antrópicas presentes como a mineração, que resultam em perda ou destruição do hábitat. Em um estudo abordando a fenologia remota por satélites utilizando dados de grande escala para os campos rupestres, foi detectada uma influência do clima e também da topografia nos padrões de NDVI, índice vegetativo que representa a produtividade foliar da vegetação (Streher et al., 2017). Neste sentido, as principais questões deste objetivo, são: Quais os padrões sazonais da produtividade do mosaico de paisagem dos campos rupestres e como variam entre os diferentes tipos de vegetação que o compõem? Quais os principais fatores ambientais que limitam a fenologia foliar destas vegetações e se existe variação espacial e temporal entre eles? Pretendemos: (i) descrever os padrões da fenologia foliar do mosaico de vegetação dos campos rupestres na Serra do Cipó com o uso de séries temporais derivadas de câmeras digitais, e (ii) investigar a influência do clima nos gatilhos da produção de folhas deste ecossistema e dentro de cada tipo de vegetação.

(iii) Análise multi-escala das dinâmicas espaço-temporais de vegetações tropicais sazonais

–Entender a ligação entre diferentes escalas de amostragem para dados fenológicos, como variam, suas limitações, e suas complementaridades, é fundamental para: um melhor entendimento das dinâmicas espaço-temporais dos ecossistemas, para validarmos efetivamente dados de grandes escalas com dados de escalas locais e para contribuirmos com a parametrização de modelos globais que procuram entender as respostas das vegetações ao clima, que na maioria das vezes negligenciam informações específicas das respostas de espécies e comunidades ao utilizarem dados em escalas regionais provenientes de satélite contendo vieses de amostragem. Associar a escala do monitoramento por câmeras digitais a escalas da paisagem de satélites é interessante por que as câmeras estão em uma escala intermediária, onde é possível colher informações da dinâmica temporal ao nível de indivíduos até comunidades ou tipos de vegetação (Hufkens et al., 2012, Melaas et al., 2016, Browning et al., 2017, Watson et al., 2019). Entender a variação de dados ecológicos em diferentes escalas é particularmente interessante para ecossistemas campestres altamente heterogêneos, onde a manutenção de observações diretas é limitada. Por isso, escolhemos utilizar os campos rupestres como a vegetação modelo para o desenvolvimento desta

investigação em múltiplas escalas espaciais e temporais. Neste objetivo, buscarei (i) comparar os padrões da fenologia foliar encontrados para as séries temporais de câmeras e satélites (ii) comparar as métricas fenológicas utilizadas para caracterizar as estações de crescimento para as séries temporais derivadas de câmeras e satélites, (iii) modelar as series temporais fenológicas com variáveis ambientais e compará-las entre as diferentes escalas, e (iii) explorar como os padrões da dinâmica da vegetação mais refinados do mosaico de vegetação dos campos rupestres podem contribuir para o entendimento da dinâmica ao nível da paisagem deste ecossistema. Essa parte do projeto deverá ser desenvolvida durante estágio no exterior (BEPE) sob a supervisão do Prof. Dr. Alfredo Huete (University of Technology Sydney), especialista mundialmente reconhecido em sensoriamento remoto e um dos principais desenvolvedores dos índices atualmente aplicados para análises de fenologia da superfície com dados de satélites.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Processamento das imagens digitais e extração dos índices de vegetação

Todas as áreas monitoradas por câmeras que serão analisadas neste estudo, incluindo vegetações florestais e/ou subarbustivas e áreas campestres (campos rupestres), estão listadas na Tabela 1.

O monitoramento fenológico é realizado com a câmera IP da marca Mobotix (Q24, www.mobotix.com) que possui lentes hemisféricas (*fisheye lens*), produzindo imagens hemisféricas ou panorâmicas. As câmeras estão posicionadas no topo de torres fenológicas, ligadas a sistemas de energia de 12V carregados por módulos solares e capturam cinco imagens, no formato JPEG em alta resolução, a cada hora, com início as 6h e término as 18h. Para áreas de difícil logística, optamos por instalar câmeras do tipo armadilhas fotográficas (com função time-lapse, das marcas Plant Cam e Bushnell) por serem de mais fácil instalação e manutenção. Essas câmeras seguem a mesma rotina de captura, com exceção de obtermos somente uma imagem por hora.

A primeira área onde iniciamos o monitoramento foi a área CORE (item 15 – Tabela 1), com início em agosto de 2011, totalizando, atualmente 7 anos. Desde então, ao longo dos anos, novas áreas foram recebendo a instalação de câmeras, e hoje a rede conta com um total de 33 áreas monitoradas, sendo 31 delas em funcionamento (Tabela 1). O processamento das imagens de todas essas áreas será o primeiro desafio deste estudo, tendo em vista que a proporção de imagens a

serem processadas e analisadas ultrapassam a marca de 1.000.000 de imagens. Para alcançar este primeiro passo, seguirei a rotina de processamento de imagens digitais estabelecida em Alberton et al. (2014, 2017).

A rotina do processamento de imagens (Fig. 1) seguirá com: (1) a aquisição do banco de imagens da rede *e-Phenology*; (2) pré-processamento que conta com: renomear as imagens, arquivos passarão a seguir o padrão de nome contendo Ano_Dia do ano_Hora_frame; e um filtro visual, neste passo todo o banco de imagens passou por uma inspeção visual para detecção de arquivos contendo erro ou imagens escuras; (3) a seleção das Regiões de Interesse (ROI), em que cada ROI representando o perfil da comunidade e/ou de uma espécie será selecionado; (4) a criação das máscaras, em que uma imagem binária com a delimitação da ROI será criada; (5) extração dos canais de cor RGB e o cálculo dos índices de vegetação (Tabela 2); e (6) aplicação de um filtro para transformar as séries temporais da frequência de valores horários em diferentes escalas temporais (diários, semanais, mensais). Os passos 2-5 serão desenvolvidos dentro do ambiente computacional PhenoViewer, desenvolvido em Java pelo projeto *e-Phenology* a fim de integrar e facilitar o processamento e análise das imagens digitais. Ao final da rotina de processamento de imagens o arquivo gerado na extensão .csv estará pronto para aplicação do filtro temporal e posterior análises que serão realizadas no ambiente R.

Tabela 2: Índices de Vegetação que serão extraídos das câmeras digitais, selecionados para este estudo.

Índices de Vegetação	Fórmula	Referência
<i>Green chromatic coordinate (Gcc)</i>	$G / R + G + B$	Woebbecke (1995)
<i>Red chromatic coordinate (Rcc)</i>	$R / R + G + B$	Woebbecke (1995)
<i>Excess Green (ExG)</i>	$2G - (R + B)$	Woebbecke (1995)
<i>Green-Red Vegetation Index (GRVI)</i>	$G - R / G + R$	Motohka (2010)

Processamento das imagens de satélite

O processamento dos dados de satélite e a extração dos índices de vegetação serão realizados durante a visita no exterior programada para este projeto. As imagens serão adquiridas para as áreas estudadas no segundo e terceiro objetivo deste projeto, que incluem as áreas do campo rupestre da Serra do Cipó, MG e as áreas da caatinga (Caat#1), do cerrado (PEG) e da Mata Atlântica (SVG), onde também temos o monitoramento por câmeras e pelos sensores de EC (*eddy*

covariance) para o cálculo de produtividade do ecossistema (Tabela 1). Pretendo usar imagens de satélite do sensor MODIS (*Moderate Resolution Image Spectroradiometer*) com resolução temporal de 7 dias e resolução espacial de 250 metros. Os índices de vegetação a serem extraídos para as análises serão o NDVI (*Normalized difference vegetation index*) e o EVI (*Enhanced vegetation index*). Essa parte do projeto deverá ser desenvolvida durante a BEPE sob a supervisão do Prof. Dr Alfredo Huete, especialista mundialmente reconhecido em sensoriamento remoto e um dos principais desenvolvedores dos índices atualmente aplicados para análises fenológicas.

Análises dos dados

Após seguir as rotinas de processamento dos dados de imagens de câmeras e satélites, o próximo passo será analisá-los por meio de gráficos e estatística. As análises iniciarão com a modelagem das séries temporais fenológicas geradas pelos dados de imagens em função do tempo, a fim de descrevermos a variação espacial entre as áreas estudadas e a dinâmica temporal da sazonalidade dentro de cada vegetação. Para a comparação entre os diferentes métodos empregados nas escalas de amostragem (câmeras e satélites), será necessário agregarmos as séries temporais em uma escala temporal comum, neste caso do satélite, por ser a de menor frequência (a cada 8 dias). As comparações serão feitas através de análises de correlação.

Pretende-se realizar a modelagem de todas as séries temporais fenológicas e variáveis ambientais com relação aos índices de vegetação (de câmera e satélite), será realizada com o uso de modelos aditivos generalizados (*Generalized additive models* – GAM). O principal motivo desta escolha está no fato dos modelos aditivos serem bastante flexíveis ao lidarem com dados não-paramétricos e suas funções não lineares (Wood, 2006), como no caso das séries temporais de alta frequência temporal (diária ou semanal) que iremos lidar durante este estudo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Durante minha bolsa de doutorado CAPES Print, minhas principais atividades incluíram (i) organizar e processar o banco de dados do phenocam, (ii) orientar alunos de graduação e (iii) preparar manuscritos para submissão, além de colaborar na leitura e redação de relatórios e outros artigos. Em relação à gestão da rede de phenocâmeras, atualizei o banco de dados da Rede e-Phenology para incluir todos os dados de imagem coletados nos últimos meses, e segui processando o banco de dados de imagens para atualizar as séries temporais fenológicas para as

análises durante este projeto. Quanto às questões ecológicas desta proposta, estive preparando o banco de dados de imagens para análise, compilando dados climáticos para associar a ele, e publiquei artigos como primeiro autor e colaborei em outros. Além disso, colaborei na escrita e leitura de relatórios e manuscritos e revisei artigos para revistas científicas. Os artigos publicados com as análises deste projeto estão em anexo a este relatório.

6. ORIENTAÇÕES

Co-orientação TCC - Arthur Bruck; Título: DINÂMICA TEMPORAL DAS TROCAS FOLIARES DE UM MOSAICO VEGETACIONAL DOS CAMPOS RUPESTRES NA SERRA DO CIPÓ, EM MINAS GERAIS, BRASIL.

Co-orientação TCC - Mateus Geovani Silva; Título: PADRÕES TEMPORAIS NA PRODUÇÃO FOLIAR RELACIONANDO TRAÇOS FOLIARES E SUAS RELAÇÕES COMO UM MECANISMO ANTI-HERBIVORIA.

7. DISCIPLINAS MINISTRADAS

Fenologia e Sazonalidade em Vegetações Tropicais – Ano:2019; Data: 06/11/2019 a 20/11/2019; Créditos: 6; Hora/aula: 120; PPG Biologia Vegetal, UNESP

Special topics in Plant Biology Near-surface remote phenology - the use of phenocams for monitoring tropical vegetations – Ano: 2019; Data: 18/11/2019 a 24/11/2019; Hora/aula: 60; PPG Biologia Vegetal, UNESP

8. COMENTÁRIOS DO SUPERVISOR

O Relatório de Bruna está excelente e mostra a dedicação e afinco da Pós-doutoranda. Bruna participou de projetos científicos, reuniões nacionais e internacionais que se integram a rede de fenocâmeras que ela colabora e ajuda a gerir. Bruna trabalha intensamente na formação de recursos humanos no grupo de pesquisa, sempre orientando alunos de graduação e mestrado, promovendo treinamento técnico e ofertando disciplinas nos programas de Pós-Graduação. Seu desempenho foi muito bom, com resultados comprovados através de suas publicações científicas como primeira autora e co-autora. Bruna teve sua licença maternidade durante o andamento desta bolsa, com o nascimento de sua filha em 29/07/2020. Portanto, sua dedicação e comprometimento são imensos e considero o relatório bem redigido.

9. REFERÊNCIAS

Abernethy, K. et al. (2018). Current issues in tropical phenology: a synthesis. *Biotropica*, 50 (3), 477-482

Aide, T. M. (1992). Dry season leaf production: an escape from herbivory. *Biotropica*, 532-537.

Alberton, B.C. et al. (2017). Introducing digital cameras to monitor plant phenology in the tropics: Applications for conservation. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 15, 82-90

Alberton, B.C. et al. (2014). Using phenological cameras to track the green up in a cerrado savanna and its on-the-ground validation. *Ecological Informatics*, 19, 62–70

Biederman, J.A., et al. (2017). CO₂ exchange and evapotranspiration across dryland ecosystems of southwestern North America. *Glob. Chang. Biol.*, 23, 4204-4221

Borchert R. (1994). Soil and stem water storage determine phenology and distribution of tropical dry forest trees. *Ecology*, 75(5), 1437-1449.

Borchert, R. et al. (2015). Insolation and photoperiodic control of tree development near the equator. *New Phytologist*, 205 (1), 7–13

Browning, D., et al. (2017) Phenocams bridge the gap between field and satellite observations in an arid grassland ecosystem. *Remote Sensing* 9.10, 1071.

Camargo, M.G.G. et al. (2018). Leafing patterns and leaf exchange strategies of a cerrado woody community. *Biotropica*, 50 (3), 442–454

Chambers, L.E. et al. (2013). Phenological Changes in the Southern Hemisphere. *PLoS ONE*, 8 (10)

Chavana-Bryant, C. (2016). Impacts of leaf age on the spectral and physiochemical traits of trees in Amazonian forest canopies. Tese de Doutorado, Universidade de Oxford

Crimmins, M. A., Crimmins, T. M. (2008). Monitoring plant phenology using digital repeat photography. *Environmental management*, 41(6), 949-958

Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski P. (1998). Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and ocean components. *Science*, 218, 237-240.

Fiedl, M. A., et al. (1994). Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite data. *Int. J. Remote Sens.* 15, 1401–1420.

Guan, K., et al. (2015) Photosynthetic seasonality of global tropical forests constrained by hydroclimate. *Nature Geoscience* 8.4, 284.

Hufkens, K., et al. (2012) Linking near-surface and satellite remote sensing measurements of deciduous broadleaf forest phenology. *Remote Sensing of Environment* 117, 307-321.

Julitta, T., et al. (2014). Using digital camera images to analyse snowmelt and phenology of a subalpine grassland. *Agricultural and forest meteorology*, 198, 116-125.

Malhi Y, Meir P, Brown S. (2002). Forests, carbon and global climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series a- Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 360 (1797), 1567-1591

Melaas, E.K., Mark A. Friedl, and Andrew D. Richardson. (2016) Multiscale modeling of spring phenology across Deciduous Forests in the Eastern United States. *Global change biology* 22.2, 792-805.

Migliavacca, M. et al. (2011). Using digital repeat photography and eddy covariance data to model grassland phenology and photosynthetic CO₂ uptake. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(10), 1325–1337

Morellato, L.P.C. et al. (2000). Phenology of Atlantic Rain Forest Trees: A Comparative Study *Biotropica*, 32(4), 811–823

Morellato, L.P.C. et al. (2016). Linking plant phenology to conservation biology. *Biological Conservation*, 195, 60–72

Morellato, LPC & Silveira, FAO. (2018). Plant life on campo rupestre: new lessons from an ancient biodiversity hotspot. *Flora*, 238, 1-10.

Nagai, S., et al. (2016). Usability of time-lapse digital camera images to detect characteristics of tree phenology in a tropical rainforest. *Ecol. Inform.* 32, 91–106.

Polgar, C.A.; Primack, R.B. (2011). Leaf-out phenology of temperate woody plants: from trees to ecosystems. *New Phytologist*, 191 (4), 926-941

R Core Team. (2017). A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria

Reed, B. C., Schwartz, M. D., Xiao, X. (2009). Remote sensing phenology: status and the way forward. In: *Phenology of Ecosystem Processes: Applications in Global Change Research*, ed A. Noormets (New York, NY: Springer-Verlag), 231–246

Reich, P.B., Borchert, R. (1984). Water Stress and Tree Phenology in a Tropical Dry Forest in the Lowlands of Costa Rica. *The Journal of Ecology*, 72 (1), 61–74

Reichstein, M. et al. (2005). On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11(9), 1424–1439

Reichstein, M. et al. (2016). REddyProc: Data processing and plotting utilities of (half-) hourly eddy-covariance measurements. R package version 0.8-2/r15

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

Richardson, A.D.R. et al. (2009). Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation. *Ecological Applications*, 19(6), 417–1428

Richardson, A.D. et al. (2018). Tracking vegetation phenology across diverse North American biomes using PhenoCam imagery. *Scientific Data*, 5, 180028

Rivera, G. et al. (2002). Increasing day-length induces spring flushing of tropical dry forest trees in the absence of rain. *Trees - Structure and Function*, 16 (7), 445–456

Silveira, F. A., et al. (2016). Ecology and evolution of plant diversity in the endangered campo rupestre: a neglected conservation priority. *Plant and soil*, 403(1-2), 129-152.

Smith, W.K, et al. (2016). Large divergence of satellite and Earth system model estimates of global terrestrial CO₂ fertilization. *Nat. Clim. Chang.* 6, 306–310.

Streher, A.S. et al. (2017). Land Surface Phenology in the Tropics: The Role of Climate and Topography in Snow-Free Mountain. *Ecosystems*, 20 (8), 1436-1453

Van Schaik, C.P.; Terborgh, J.W. And Wright, S.J. (1993). The Phenology of Tropical Forests - Adaptive Significance and Consequences for Primary Consumers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 24, 353–377

Wagner, F.H., et al. (2016) Climate seasonality limits leaf carbon assimilation and wood productivity in tropical forests. *Biogeosciences* 13.8, 2537-2562.

Watson, C. J., Restrepo-Coupe, N., & Huete, A. R. (2019). Multi-scale phenology of temperate grasslands: improving monitoring and management with near-surface phenocams. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 14.

Wood, S.N. (2006). Generalized additive models: an introduction with R. *Texts in statistical science*, Chapman and Hall/CRC, p. 392

Wright, S.J. And Van Schaik, C.P. (1994). Light and the Phenology of Tropical Trees. *The American Naturalist*, 143 (1), 192–199

Yan, D., et al. (2019). Understanding the relationship between vegetation greenness and productivity across dryland ecosystems through the integration of PhenoCam, satellite, and eddy covariance data. *Remote Sensing of Environment*, 223, 50-62.

ANEXO 1

Wang, J., Song, G., Liddell, M., Morellato, P., Lee, C.K., Yang, D., Alberton, B., Detto, M., Ma, X., Zhao, Y. and Yeung, H.C., 2023. An ecologically-constrained deep learning model for tropical leaf phenology monitoring using PlanetScope satellites. *Remote Sensing of Environment*, 286, p.113429.

ANEXO 2

Alberton, B., Martin, T., Da Rocha, H.R., Richardson, A.D., De Moura, M.S., Torres, R.D.S. and Morellato, P.C., 2023. Evaluating the relationship between tropical leaf phenology and ecosystem productivity using phenocameras. *Frontiers in Environmental Science*, 11, p.1223219.

ANEXO 3

Alberton, B., Alvarado, S.T., da Silva Torres, R., Fernandes, G.W. and Morellato, L.P.C., 2023. Monitoring immediate post-fire vegetation dynamics of tropical mountain grasslands using phenocameras. *Ecological Informatics*, 78, p.10234.

ANEXO 4

Ramos, D.M., Andrade, J.M., Alberton, B.C., Moura, M.S., Domingues, T.F., Neves, N., Lima, J.R., Souza, R., Souza, E., Silva, J.R. and Espírito-Santo, M.M., 2023. Multiscale phenology of seasonally dry tropical forests in an aridity gradient. *Frontiers in Environmental Science*.