

Sensoriamento Remoto aplicado ao Índice de Área Foliar e fração da radiação fotossinteticamente ativa em áreas de floresta e pastagem na Amazônia Ocidental

Gutieres Camatta Barbino^{1*}, Bárbara Antonucci², Dione Judite Ventura³, Nara Luísa Reis de Andrade⁴

¹Mestrando em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal da Fronteira Sul, Brasil (*Autor correspondente: gutieres.barbino@gmail.com).

²Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, Brasil.

³Doutoranda em Ciência do Sistema Terrestre, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil.

⁴Doutora em Física Ambiental, Professora da Universidade Federal de Rondônia, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 29/12/2020 – Revisado em: 07/04/2021 – Aceito em: 08/05/2021

RESUMO

O presente estudo objetivou caracterizar o Índice de Área Foliar (IAF) e correlacioná-lo com a fração da radiação fotossinteticamente ativa (fPAR) em áreas de floresta (Reserva Biológica do Jaru) e pastagem (Fazenda Nossa Senhora) localizadas no estado de Rondônia, Brasil. Os dados utilizados entre 2000 e 2015 são provenientes do produto MOD15A2 do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*, disponibilizado gratuitamente pela *National Aeronautics and Space Administration*. O maior IAF na floresta ocorreu em 2005, com média de 5,45 m² m⁻², e, na pastagem, no ano de 2003, com média de 2,01 m² m⁻². Os menores valores para os dois sítios ocorreram em 2006, com média de 4,98 e 1,71 m² m⁻² para floresta e pastagem, respectivamente. A análise de correlação demonstrou que ambos os sítios apresentaram correlação positiva significativa entre IAF e fPAR na floresta e na pastagem. Diante disso, a disponibilidade hídrica e a fitofisionomia vegetal são os principais fatores determinantes da variabilidade dos dados de IAF e fPAR, no entanto, foi observada resposta diferenciada entre floresta e pastagem. Na floresta, o IAF e a fPAR aumentaram em anos de seca e no período seco e diminuíram nos anos de cheia e nos períodos úmido e de transição. Embora na pastagem não seja observado um padrão interanual em resposta aos eventos extremos como na floresta, as respostas são mais rápidas aos fatores sazonais, devido às diferenças fisiológicas e de adaptação que este ecossistema apresenta em relação aos fatores abióticos, como em situações de estresse hídrico.

Palavras-Chave: Mudanças no uso da terra, Índices vegetativos, MODIS.

Remote Sensing applied to the Leaf Area Index and fraction of photosynthetically active radiation in forest and pasture areas in Western Amazonia (Brazil)

ABSTRACT

The present study aimed to characterize the Leaf Area Index (LAI) and correlate with the fraction of photosynthetically active radiation (fPAR) in forest areas (Reserva Biológica do Jaru) and pasture (Fazenda Nossa Senhora), located in the state of Rondônia, Brazil. The data used between 2000 and 2015 comes from the MOD15A2 product of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer sensor, available free of charge by the National Aeronautics and Space Administration. The highest LAI value for the forest occurred in 2005, with an average of 5.45 m² m⁻², and, in the pasture, in 2003, with an average of 2.01 m² m⁻². The lowest values for the two sites occurred in 2006, with an average of 4.98 and 1.71 m² m⁻², for forest and pasture, respectively. The correlation analysis showed that both sites showed a significant positive correlation between the LAI and fPAR in the forest and in the pasture. Therefore, the water disponibility and plant phytophysognomy are the main determinants of the variability of LAI and fPAR data, however, forest and pasture have a different responses. In the forest, the LAI and the fPAR increased in the years dry and season dry and decreased in the years wet and season wet and the transition wet-dry. But, in the pasture, not be observed a pattern interannual in response to the extreme event as in forest, the responses are more rapid to seasonal factors, because of the physiological differences and the adaptation that this ecosystem presents in relation to abiotic factors, as water stress.

Keywords: Changes in land use, Greenery index, MODIS.

Barbino, G. C., Antonucci, B., Ventura, D. J. S., & Andrade, N. L. R. (2021). Sensoriamento Remoto aplicado ao Índice de Área Foliar e fração da radiação fotossinteticamente ativa em áreas de floresta e pastagem na Amazônia Ocidental. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.9, n.2, p.76-90.



1. Introdução

A floresta Amazônica tem importância global tanto pela sua biodiversidade, como pelos diversos serviços ambientais prestados. Destaca-se, também, a sua importância para a manutenção do ciclo da água e o papel de sumidouro de dióxido de carbono (CO₂) (Chambers & Artaxo, 2017; Sullivan et al., 2020), sendo este apontado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014) como propulsor do aquecimento global. No entanto, nas últimas décadas, a rápida conversão de florestas em culturas por meio do desmatamento seguido das queimadas (Fearnside, 2018) tem causado alterações nos ciclos do carbono e da água. Isso ocorre, principalmente, devido às diferenças fisiológicas entre as florestas e as pastagens que alteram a capacidade de aproveitamento da radiação para fotossíntese (Niyogi et al., 2004) e a resiliência do microclima no qual as pastagens sofrem mais com o estresse hídrico. De fato, von Randow et al. (2004) quantificaram uma diminuição de 24% e 17% na taxa de evapotranspiração nos períodos seco e chuvoso, respectivamente, entre floresta e pastagem no Estado de Rondônia (sudoeste da Amazônia). Recentemente, os autores Wu et al. (2020), analisando a taxa de evapotranspiração nos mesmos sítios que von Randow et al. (2004), relataram perda de 258 mm de água por ano para a atmosfera com a conversão de florestas em pastagem.

Neste contexto, as quantificações das taxas fotossintéticas são cruciais para entender os efeitos da conversão de florestas em pastagens no ciclo do carbono e da água na Amazônia, principalmente no Estado de Rondônia, que tem sido apontado como uma área de risco de savanização climática (Pires & Costa, 2013). No entanto, poucos estudos fizeram medições diretas de Índice de Área Foliar (IAF) na pastagem (Zanchi et al., 2009; Ruezzen et al., 2018), assim como na floresta (Barbino, 2017; Fernandes, 2017). Tal fato se dá devido às dificuldades de logística de campo, recursos humanos e de instrumentação na Amazônia.

O sensoriamento remoto veio para complementar as medidas *in situ* e tem sido uma alternativa viável para a resolução deste problema. Neste cenário, os produtos do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) são apontados como satisfatórios para a determinação do IAF (Houborg, McCabe & Gao, 2016; Jiang et al., 2017; Wang, Xiao & Liu, 2017), bem como para a caracterização da fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (fPAR) (Ma et al., 2017; Tao et al., 2016). Assim, tais indicadores são importantes para analisar as possíveis alterações impostas pela conversão de florestas em pastagens.

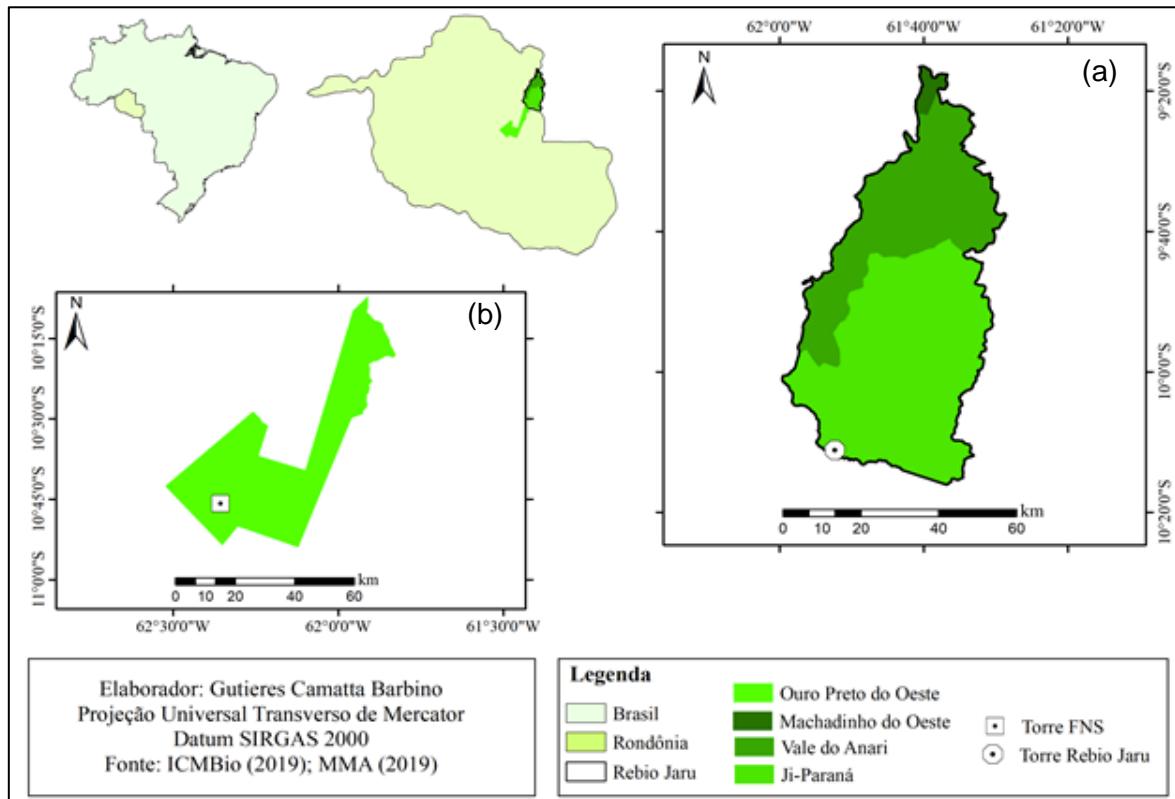
Diante disso, este estudo tem como objetivo caracterizar as variações sazonais e interanuais do IAF e correlacioná-las com a fPAR em áreas de pastagem e floresta no Estado de Rondônia, Amazônia Ocidental.

2. Material e Métodos

A presente pesquisa foi realizada em dois sítios de estudos vinculados ao Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA), sendo um situado em uma área de floresta na Reserva Biológica do Jaru (Rebio Jaru) e o outro em uma área de pastagem na Fazenda Nossa Senhora (FNS), ambos localizados no estado de Rondônia, Brasil (Figura 1).

O solo da floresta e da pastagem foi classificado por Ballester et al., (2012) como Argissolo Vermelho Amarelo e Vermelho Amarelo Escuro e o relevo, como planície. O solo, conforme Alvalá et al. (2002), é constituído, em sua maior parte, por areia, representando aproximadamente 80% em ambos os sítios. A floresta tem menor composição de matéria orgânica, a exemplo da camada de 0-0,05, com média e desvio padrão de $1,59 \pm 0,14$ e $2,0 \pm 0,2$, respectivamente.

Figura 1 – Localização das áreas de estudo. (a) Reserva Biológica do Jaru (Rebio Jaru) e (b) Fazenda Nossa Senhora (FNS), Estado de Rondônia.



A Rebio Jaru está localizada no município de Ji-Paraná, fazendo parte também dos municípios de Machadinho D'Oeste e Vale do Anari. A vegetação prevalecente é a de Floresta Ombrófila Aberta (Culf et al., 1997), com características de terra-firme e altura média do dossel de aproximadamente 32 m (Rummel et al., 2002). Segundo Costa et al. (2010), a média anual da temperatura do ar na Rebio Jaru é de 22,9°C e a precipitação média anual é de 1.989,65 mm (Oliveira, 2014).

Ambos os sítios possuem 4 períodos sazonais, sendo eles: período úmido (janeiro a março), período úmido-seco (abril a junho), período seco (julho a setembro) e período seco-úmido (outubro a dezembro) (Webler et al., 2013).

A Fazenda Nossa Senhora (FNS) é uma área de pastagem situada no município de Ouro Preto do Oeste. Foi desmatada no ano de 1977 e possui um raio de aproximadamente 50 km e 4 km² de área. Está localizada a cerca de 11 km da área urbana do município, com altitude por volta de 220 m acima do nível do mar (Culf et al., 1997), a 50 km a oeste de Ji-Paraná e a 100 km da Rebio Jaru, aproximadamente. O sítio possui uma cobertura vegetal predominantemente composta por gramínea *Brachiaria brizantha*, além de pequenas palmeiras dispersas. A temperatura média do ar é de 24,81°C (Webler et al., 2013) e a precipitação média anual, de 1.768,04 mm (Oliveira, 2014).

Os dados de IAF – área total da superfície da folha por unidade de superfície do solo horizontal (área) (Chen & Black 1992) – e fPAR – fração da radiação solar absorvida pela vegetação verde na faixa espectral de 400-700 nm (Liang, Li e Wang (2012) – utilizados neste estudo correspondem ao período de fevereiro de 2000 a agosto de 2015. Estes dados são provenientes do produto MOD15A2 do sensor MODIS, disponibilizado gratuitamente pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), com resolução

temporal de 8 dias e resolução espacial de 1 km. No total, foram selecionados 9 pixels para cada área de estudo.

Os produtos de IAF e fPAR do MODIS são fundamentados em modelos de radiação do dossel para modelar o IAF e a fPAR a partir de medições da reflectância superficial. Para estimar a radiação do dossel, devem ser seguidas três características importantes, sendo elas: a estrutura de árvores individuais e de todo o dossel; propriedades ópticas dos elementos de vegetação e solo; e condições atmosféricas que determinam a radiação incidente (Justice et al., 1998).

Os dados foram filtrados conforme o controle de qualidade (QC) disponibilizado em conjunto com o produto MOD15A2, sendo excluídos os dados de QC “péssimos”, visando evitar possíveis incoerências e valores errôneos. Posteriormente, com o intuito de homogeneizar os dados, foram recalculadas as médias mensais das variáveis para ambos os sítios. A estatística descritiva dos dados é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Estatística descritiva do conjunto de dados da Rebio Jaru e da FNS (série temporal de 2000-2015, n = 192).

	Rebio Jaru		FNS	
	IAF*	fPAR*	IAF	fPAR
Média	4,97	0,81	1,87	0,56
Desvio Padrão	0,86	0,08	0,42	0,09
Máximo	6,45	0,90	2,93	0,73
Mínimo	2,06	0,58	1,00	0,32

Nota: * significa que o conjunto de dados não apresentou normalidade.

A normalidade do conjunto de dados foi obtida pelo teste de normalidade Shapiro-Wilk, com 95% de confiança. Visto que os dados da Rebio Jaru não apresentaram normalidade, foi dada sequência às análises utilizando testes não-paramétricos para avaliar as médias mensais e anuais. A comparação entre as médias anuais ocorreu por meio do teste de Mann-Whitney e a análise de correlação de Spearman foi usada para analisar a relação entre as variáveis IAF e fPAR, em cada sítio.

3. Resultados e Discussão

A seguir serão analisados o IAF e a fPAR dos sítios da floresta e da pastagem, bem como as suas variações anuais e mensais.

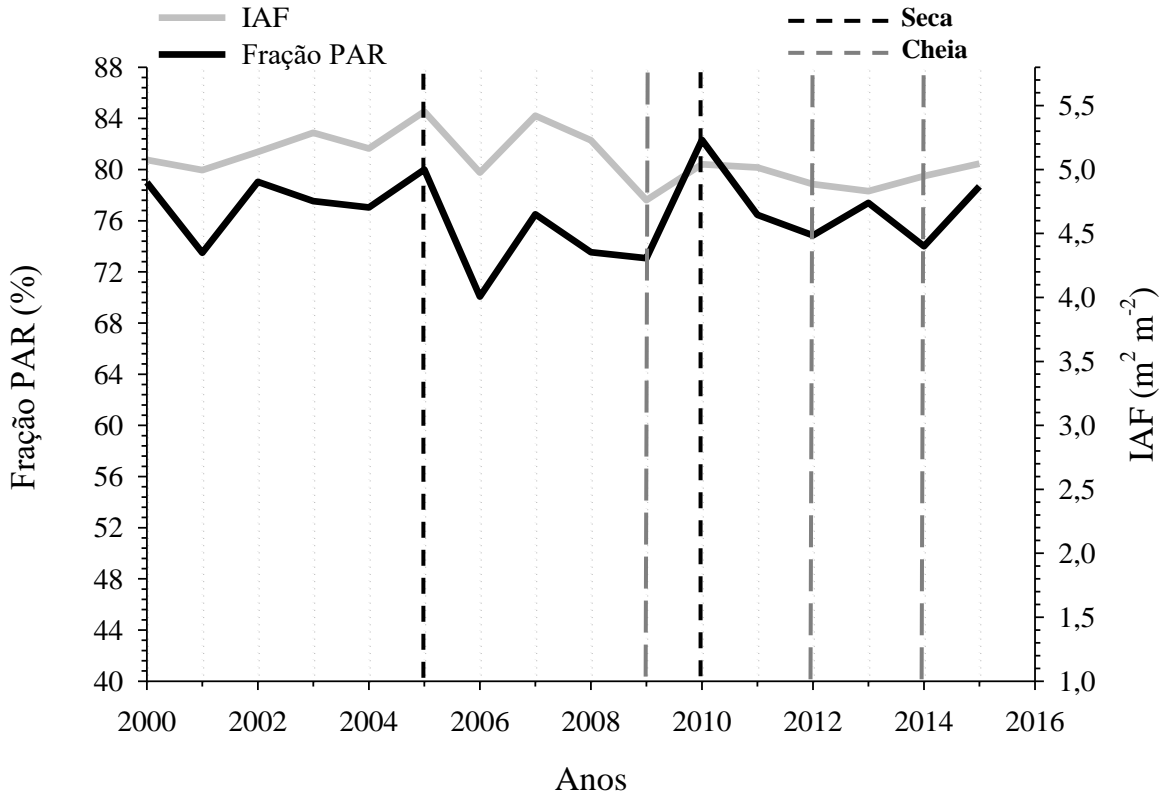
3.1. Reserva Biológica do Jaru

A variação anual das médias de IAF e fPAR na floresta são observadas na Figura 2. As médias da série de dados do IAF e da fPAR entre todos os anos (2000 a 2015) foram estatisticamente diferentes (p -valor $<0,05$). De uma forma geral, a Figura 2 mostra que não existe uma relação direta entre o IAF e a fPAR na maioria dos anos, apenas entre 2005 e 2009. Entretanto, em 2010 a fPAR aumentou sem resposta ao IAF. Este resultado coincide com os anos de eventos extremos descritos por Marengo & Espinoza (2016), sendo estes as secas em 2005 e 2010 e a cheia em 2009, indicando que a floresta altera a capacidade de regulação da evapotranspiração e da fotossíntese em anos de eventos extremos.

Nota-se que o IAF alcançou maiores valores em 2005 e 2007, de 5,45 e 5,42 $m^2 m^{-2}$, respectivamente, e o menor valor em 2006 (pós-seca), de 4,76 $m^2 m^{-2}$. Diante disso, sugere-se que os efeitos da seca foram mais evidentes no ano subsequente, pois houve uma diminuição do IAF como resposta da floresta ao estresse hídrico no ano pós-seca, no qual a floresta perdeu mais folhas que a média do período, em resposta aos baixos níveis de precipitação durante os eventos de seca.

Por sua vez, o prolongamento da seca acarreta o estresse hídrico da vegetação (Marengo et al., 2011), que busca, por meio da evapotranspiração, a regulação da quantidade de água disponível para a fotossíntese, como, por exemplo, por meio do fechamento dos estômatos, com consequente perda das folhas (Marengo et al., 2014). Dessa forma, observou-se que a floresta não sofre os efeitos da seca de imediato, sendo o tempo de resposta mais evidente no ano posterior ao evento.

Figura 2 – Variação anual do Índice de Área Foliar (IAF) e da fração da radiação fotossinteticamente ativa (fPAR) na Reserva Biológica do Jaru (Rebio Jaru), entre os anos 2000 e 2015. As linhas tracejadas são os eventos extremos: a cor preta indica as secas nos anos de 2005 e 2010 e a cor cinza, as cheias nos anos de 2009, 2012 e 2014.

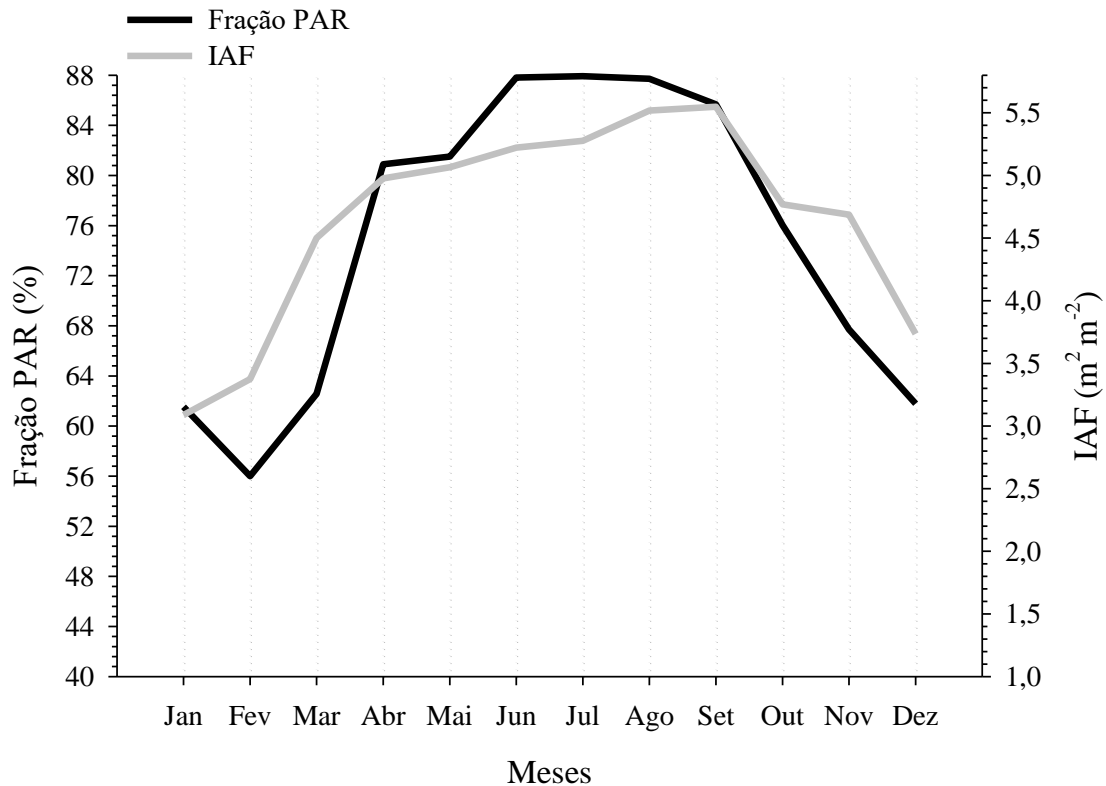


Em relação à fPAR, observa-se um aumento nas secas de 2005 e 2010, com médias de 80% e 82,32%, respectivamente. Este resultado pode suportar a relação apontada pelo INPE (2020) entre os anos de seca extrema e o aumento de queimadas, que tem como consequência um aumento no aporte de aerossóis e da difusão da radiação na Rebio Jaru (Braghiere et al., 2020; Cirino et al., 2014; Oliveira et al., 2007). Os resultados diferem dos resultados de Araújo et al. (2013), Higuchi et al. (2011), McDowell et al. (2011), que constataram que nos períodos de estiagem e eventos extremos de seca ocorrem a mortandade das árvores e a diminuição da disponibilidade de água no solo, restringindo a absorção de carbono e a produção de biomassa florestal, com consequente diminuição do IAF.

A distribuição mensal do IAF e da fPAR na Rebio Jaru pode ser observada na Figura 3. Ocorre um decréscimo no período de transição de seco para o úmido de outubro a janeiro, aumentando continuamente de fevereiro até setembro, o que indica uma relação indireta com as chuvas e a disponibilidade de água. Este comportamento é condizente com o relatado por von Randow et al. (2004), em que a floresta da Rebio Jaru,

no período de transição úmido-seco (junho), aproveita a água presente na camada mais superficial da floresta e, com o avanço do período seco, passa a utilizar água do nível mais profundo do solo (isto pode ser favorecido pelo comprimento das raízes). Embora em outubro iniciem as chuvas, ocorre uma lenta reposição da reserva hídrica do solo e a resposta da vegetação ao novo aporte de água no sistema só será observada a partir de fevereiro.

Figura 3 – Variação mensal do Índice de Área Foliar (IAF) e da fração da radiação fotossinteticamente ativa (fPAR) na Reserva Biológica do Jaru (Rebio Jaru).



Diante disso, observa-se que a floresta atinge seu ponto máximo de aproveitamento de energia em junho, com fPAR em 88,02%, e se mantém estável até agosto. Em setembro, sofre uma redução de 4%, no entanto, é o mês com maior IAF (5,60 m² m⁻²). Esses resultados indicam que não só a floresta é altamente adaptada à escassez de chuvas na região, como também atinge sua máxima capacidade de utilização de energia e desenvolvimento vegetal ao final do período de seca. É importante observar que a diminuição, tanto no IAF, como na fPAR, no mês de outubro, pode também estar relacionada com a presença de espécies decíduas na área de estudo, ou seja, perdem folhas após serem submetidas a estresse hídrico, visto que a Rebio Jaru é caracterizada como uma florestal semidecidual, como indicam os estudos de Danelichen et al. (2016).

Outro aspecto a ser considerado é que a floresta possui uma maior resistência e resiliência às influências sazonais, sentindo os efeitos do estresse hídrico algum tempo depois, além de possuir espécies que promovem a redistribuição da água no solo das regiões mais profundas (úmidas) para as regiões mais superficiais (secas), por meio do fluxo de seiva nas raízes e caules (Oliveira et al., 2005). O sistema radicular

dimórfico de algumas espécies pode desempenhar um papel facilitador no crescimento das folhas perto do final da estação seca, quando o solo que rodeia as raízes rasas laterais ainda está seco (Brum et al., 2017), como observado por Scholz et al. (2002), em estudo realizado no cerrado brasileiro.

Analisando as variáveis fPAR e IAF (Figura 3), são observados menores valores da fPAR durante os períodos úmido e de transição seco-úmido. Infere-se que esta diminuição ocorra devido ao aumento de cobertura de nuvens que conseqüentemente prejudica a realização da fotossíntese pelo dossel. Corroborando este resultado, Aguiar et al. (2012) encontraram que na Rebio Jaru ocorre uma atenuação da PAR do total da radiação solar global em períodos com maior cobertura de nuvens.

Diante dos resultados para o período chuvoso na Rebio Jaru e extrapolando para os anos de cheia, que foram 2009 (Marengo et al., 2012), 2012 (Marengo & Espinoza, 2016) e 2014 (Silva Dias, 2014), observa-se um decréscimo dessas variáveis em relação aos anos normais (Figura 2), sendo mais acentuado no ano de 2009, o qual apresentou o menor IAF e fPAR da série, com $4,76 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e 73%, respectivamente. Isso indica que a saturação de água no solo seja um fator limitante, como observado na análise do padrão sazonal. Outro fator que pode ser apontado é o aumento de cobertura de nuvens, que conseqüentemente prejudica o uso da radiação pelo dossel para realização da fotossíntese. Corroborando este resultado, Aguiar et al. (2012), analisando a Rebio Jaru, estimam que de outubro a janeiro as nuvens atenuaram, em média, ~43% da Radiação Fotossinteticamente Ativa (*Photosynthetically Active Radiation* – PAR).

A relação observada nas Figuras 2 e 3 entre os dados de IAF e fPAR apresentou uma relação causal com correlação positiva significativa ($r = 0,88$; $p\text{-valor} < 0,05$) e, partindo do pressuposto da relação inversa entre a quantidade de chuva, pode-se inferir que o aumento do IAF influenciou na maior absorção da fPAR nos anos de seca (2005 e 2010), sendo observado comportamento inverso para os anos de cheia (2009, 2012 e 2014). Tal observação permite inferir que a disponibilidade hídrica e a fitofisionomia florestal são os principais fatores determinantes da variabilidade dos dados de IAF e fPAR, tanto mensalmente, quanto interanualmente. Assim, há indícios de que a floresta absorveu mais carbono por meio da fotossíntese em anos de seca, visto que a fPAR foi mais utilizada pelo dossel florestal nesses anos e que isso pode ser relacionado ao aumento de aerossóis nestes períodos.

3.2. Fazenda Nossa Senhora

A variação anual das médias de IAF e fPAR na pastagem é observada na Figura 4. As médias da série de dados do IAF e da fPAR entre todos os anos (2000 a 2015) foram estatisticamente diferentes ($p\text{-valor} < 0,05$), ou seja, todos os anos são diferentes entre si. É possível observar que, embora o IAF siga uma variação média em torno de $1,87 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, a fPAR sofre variações mais bruscas.

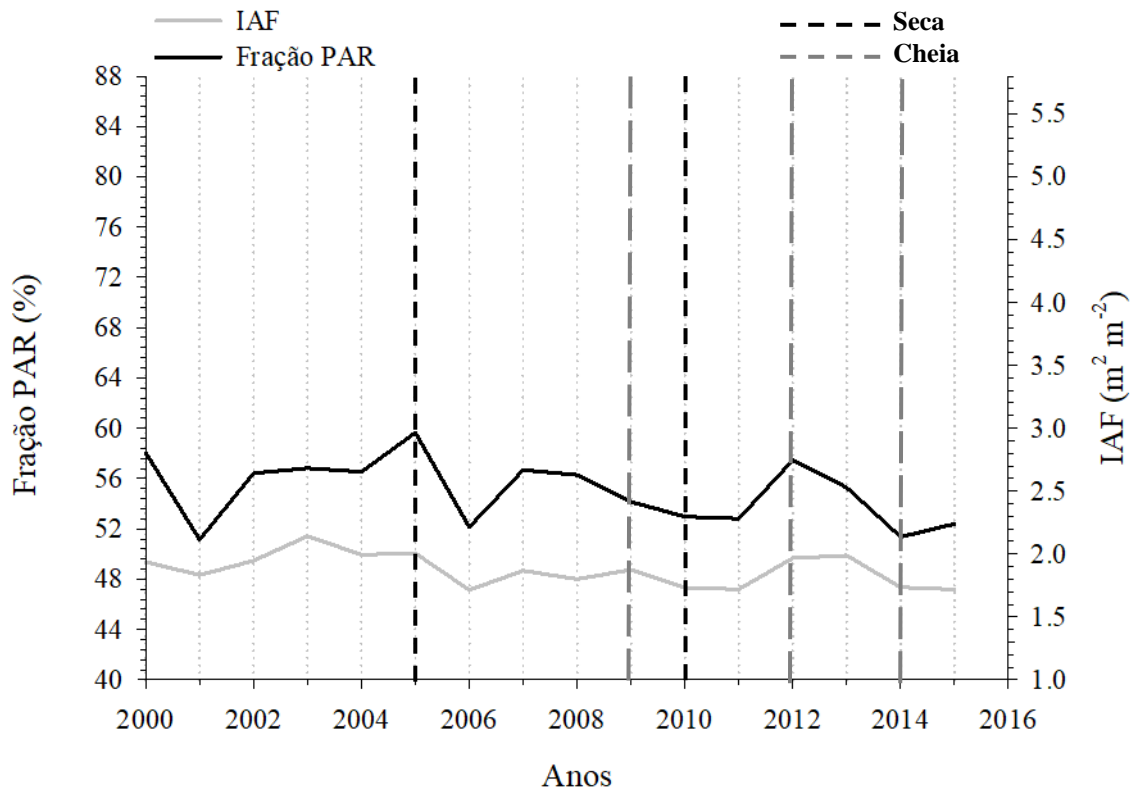
No ano de 2005, tanto o IAF, como a fPAR apresentaram incremento em relação aos anos anteriores, alcançando as médias de 59,64% e $2,01 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, respectivamente, sendo o ano de 2005 de extrema seca (Marengo & Espinoza, 2016). Este comportamento indica que a pastagem não sofreu tanta influência deste evento, mas houve uma diminuição, principalmente do IAF, após eventos de seca, a citar 2006, 2011 e 2015, com média de $\sim 1,71 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, em que os dois primeiros são posteriores aos eventos de seca extrema e o ano de 2015 estava sobre influência do *El Niño*, o qual ocorreu de setembro a novembro (INPE, 2016), interferindo, portanto, no regime de chuva da região.

Corroborando com os resultados encontrados para o IAF, Zanchi et al. (2009), ao analisarem o IAF pelo método destrutivo entre 1999 e 2005 na FNS, encontraram a maior média anual em 2003 ($2,8 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$), a qual atribuem ao manejo do pasto a explicação para esse alto valor, visto que no período úmido de 2003 houve redução acentuada do pastejo. Em estudos realizados em áreas recobertas por campos naturais e floresta de transição na região Sul do Amazonas, Jordão et al. (2015) relatam valores entre $1,72 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $2,03 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Os autores Danelichen et al. (2014), utilizando produtos MOD15A2, encontraram valores variando

de $1,66 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ a $1,76 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para o período de 2006 a 2009 em uma pastagem localizada em uma fazenda experimental da Universidade Federal do Mato Grosso.

Em relação às comparações acima realizadas, é possível observar que o IAF encontrado na FNS foi superior em todos os anos, representando maior produção de biomassa vegetal e maior utilização de fPAR pela pastagem *Brachiaria brizantha*, usando cerca de 56,82% da PAR na fotossíntese. Tal comportamento pode estar relacionado aos fatores abióticos, tais como as condições externas da atmosfera, principalmente com o aproveitamento da PAR e a estrutura e composição natural da vegetação (Marques Filho, Dallarosa e Pachêco, 2005).

Figura 4 – Variação anual do Índice de Área Foliar (IAF) e da fração da radiação fotossinteticamente ativa (fPAR) na Fazenda Nossa Senhora (FNS), entre os anos 2000 e 2015. As linhas tracejadas são os eventos extremos: a cor preta indica as secas nos anos de 2005 e 2010 e a cor cinza, as cheias nos anos de 2009, 2012 e 2014.

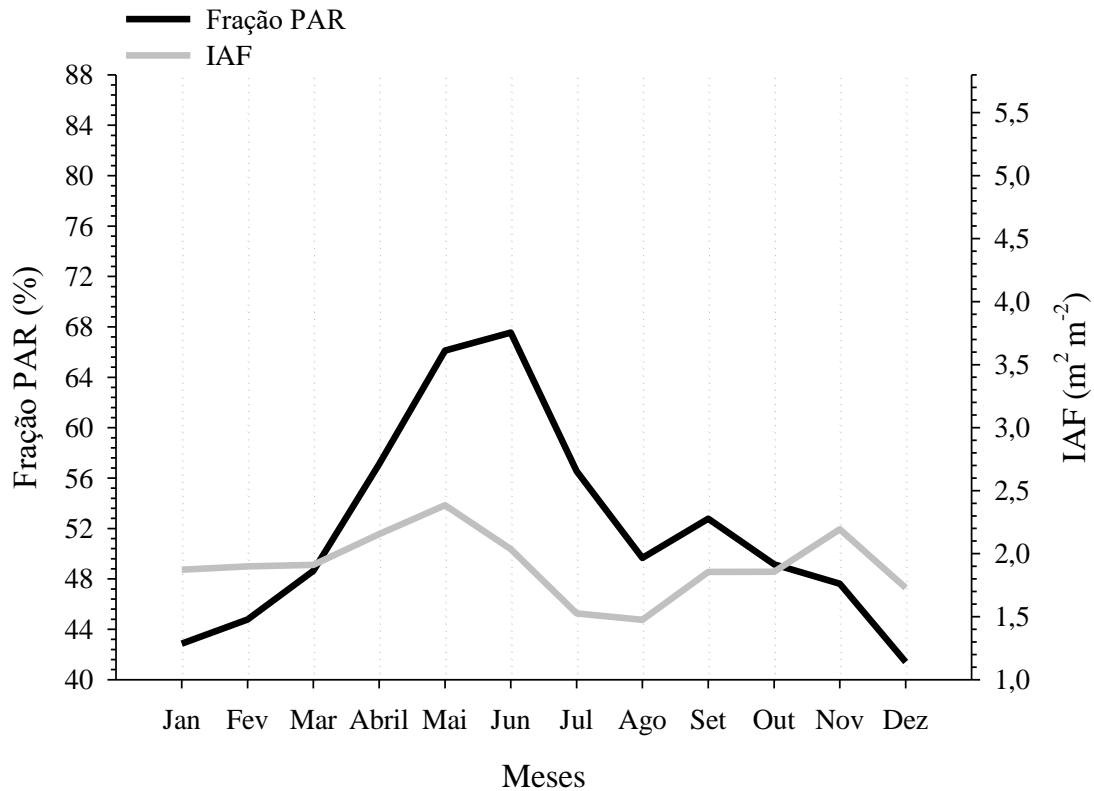


Na Figura 5 é apresentada a variação mensal do IAF e da fPAR para a FNS. Foram encontrados os maiores valores no período de transição úmido para o seco, com médias de $2,2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ no mês de abril e $2,38 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ no mês de maio. Os menores valores foram observados no período seco, sendo esses nos meses de agosto e julho, com médias de $1,47 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $1,53 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, respectivamente. Após o período seco, nos períodos seco-úmido e úmido, o IAF apresentou tendência a aumento, sendo assim, este resultado corrobora com o relatado por von Randow et al. (2004), que ressalta que a variação da quantidade de água no solo da FNS na camada de até 2 m é crucial para pastagem, devido à profundidade das raízes.

Neste contexto, Kuwahara e Souza (2009) citam que a deficiência hídrica provocada por seca estacional influencia a relação entre a água e as trocas gasosas nas gramíneas forrageiras tropicais, quando

ocorre o fechamento dos estômatos que atuam na regulação da entrada de CO_2 na folha e na perda de vapor d'água pela transpiração. Neste contexto, Jordão et al. (2015) e Zanchi et al. (2009) elucidam que os baixos valores de IAF podem estar relacionados com a quantidade de água disponível no solo ao alcance das raízes das gramíneas. Isso acontece devido ao fato das plantas fecharem seus estômatos, modificando seu metabolismo, causando, assim, mudanças em sua fisiologia, com o intuito de reduzir a perda de água por transpiração (Jacobsen, Liu & Jensen, 2009).

Figura 5 – Variação mensal do Índice de Área Foliar (IAF) e da fração da radiação fotossinteticamente ativa (fPAR) na Fazenda Nossa Senhora (FNS).



Nota-se uma diminuição do IAF do mês de novembro para dezembro, sendo observada essa variação também na fPAR, em que o IAF passou de $2,2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para $1,73 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e a fPAR, de 47,61% para 41,41%, representando, assim, um comportamento díspar, visto que Oliveira (2014) cita a precipitação em torno de 210 mm para novembro e 250 mm para o mês subsequente. Desta forma, o déficit hídrico não seria um fator determinante para a diminuição dos valores dos parâmetros no período de novembro a dezembro, mas, sim, o pastoreio de gado que tende a se intensificar com o crescimento de novos brotos com o início das chuvas.

Na mesma área de estudo, Zanchi et al. (2009), analisando a sazonalidade pelo método destrutivo, constataram que o IAF é maior no período úmido e menor no período seco, com médias de $2,2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $1,7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, respectivamente. Este resultado é semelhante ao encontrado nesta pesquisa no que diz respeito ao período seco, apresentando valores bem próximos. Porém, os resultados diferem em relação ao período em que o IAF é maior, sendo que nesta pesquisa o período de maior IAF é o período úmido-seco. Vale ressaltar que em seu estudo, os autores não fizeram separação dos períodos de transição. Os autores relatam ainda que

o IAF na FNS é dependente da variação sazonal da umidade do solo, sendo que essa é menor no período seco, ou seja, o IAF diminui devido ao fechamento dos estômatos.

Em comparação com o Pantanal, os autores Danelichen et al. (2014) encontraram maiores valores de IAF no período úmido (mês de março), de $2,49 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, e os valores mais baixos no período seco (mês de agosto), de $0,94 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Sendo assim, embora no mês de agosto a FNS também tenha seu menor IAF – $1,47 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ – este é superior ao do Pantanal. Por outro lado, os maiores valores de IAF no Pantanal parecem ser respostas ao acumulado de chuvas do período úmido, o que não é visto na FNS, que tem o maior IAF em maio, com $2,38 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Uma possível explicação para esta resposta do IAF é a presença de nuvens, que, conforme Webler et al. (2013), diminuem do período úmido para o úmido-seco, aumentam em 11,5% o fluxo de calor latente (LE) e em 26,3% o fluxo de calor sensível (H) e, conseqüentemente, a disponibilidade de energia, que, atrelada à disponibilidade de água neste período, facilita o desenvolvimento da planta. De uma forma geral, as comparações entre a FNS e o Pantanal são explicadas por Ruhoff (2011) como resultado da variação da evapotranspiração, que se dá em função, sobretudo, do índice de área foliar e da temperatura do ar entre as coberturas vegetais.

A diminuição do IAF no período seco, tanto neste estudo, quanto nos demais citados anteriormente, pode estar relacionada a diversos fatores. De acordo com Araújo e Ponte (2016) e Amorim, Senna e Cataldi (2019), a diminuição da precipitação após o desmatamento é uma consequência das mudanças na umidade e no balanço de energia na região. Dessa forma, a sazonalidade bem definida da região, aliada ao desmatamento, influencia no regime de chuvas, fazendo com que chova menos em determinados períodos e, assim, aconteça um declínio acentuado do IAF.

Com a sazonalidade da precipitação, o particionamento de energia no período seco da FNS também pode estar relacionado a essa queda. Os autores Gomes et al. (2015) e Webler et al. (2013) observaram que no período seco há uma queda do LE, enquanto o H aumenta. Isso pode estar relacionado à interação de três fatores: o aumento do albedo, que influencia na partição de energia; a redução da rugosidade, em decorrência da alteração da cobertura do solo; e das diferenças fisiológicas das plantas de uma área de floresta para uma área de pastagem (Senna et al., 2009).

Ao comparar os dados de IAF e fPAR, foi verificado comportamento similar entre as variáveis, com correlação positiva ($r = 0,86$, p -valor $<0,05$), assim sendo, é possível inferir que o aumento de IAF ocorreu em função da maior absorção de fPAR pela pastagem e, analisando as Figuras 4 e 5, foi possível observar que a sincronia na variação mensal de IAF e fPAR foi maior, ou seja, a pastagem é mais influenciada por fatores sazonais do que anuais. Sobre o comportamento resposta da pastagem à sazonalidade climática, Rodrigues (2012) correlacionou à intensidade luminosa, à produção de massa seca e ao IAF, encontrando correlação positiva e significativa, que atuam em um ciclo em que a maior área foliar resultou em maior porcentagem da interceptação de luz pelas forrageiras e aumento de capacidade fotossintética do pasto, que culminou em maior produção, explicando o comportamento na FNS.

4. Conclusão

Por meio do produto MOD15A2, foi possível caracterizar a dinâmica vegetal correspondente às respostas dos ecossistemas às variações sazonais e interanuais da precipitação e, conseqüentemente, ao aproveitamento da PAR. As variações observadas, tanto no IAF, como na fPAR, foram condizentes com o encontrado na literatura científica. Na Rebio Jaru, as variáveis IAF e fPAR apresentaram maiores valores em anos de seca e no período seco e menores valores nos anos de cheia e nos períodos úmido e de transição da seca para úmido. Esse comportamento é atribuído ao retardamento da resposta da vegetação aos períodos de estresse hídrico, uma vez que uma área de floresta retém no solo mais água proveniente de épocas chuvosas, minimizando os efeitos dos períodos secos na vegetação. Por sua vez, na pastagem não foi possível observar um padrão interanual bem definido em relação às respostas aos anos de eventos extremos, como ocorreu na

Rebio Jaru, sendo que culminam em respostas mais rápidas aos fatores sazonais, devido às diferenças fisiológicas e de adaptação que este ecossistema sofre em relação aos fatores abióticos, como em situações de estresse hídrico.

Diante disso, o IAF e a fPAR são importantes indicadores para a dinâmica vegetal, principalmente em anos de eventos extremos. Sugere-se que estudos posteriores façam validação entre as variáveis medidas em campo e os produtos gerados por sensoriamento remoto para uma maior compreensão da interface solo-planta-atmosfera e suas trocas de água e carbono, visto que o uso de produtos de satélites MODIS para a determinação de IAF e fPAR produzem dados confiáveis e podem ser uma alternativa à escassez de dados observacionais na Amazônia.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio científico do Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA), escritório regional de Ji-Paraná, e ao grupo de pesquisa Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Rondônia.

6. Referências

Aguiar, L. J. G., Fischer, G. R., Ladle, R. J., Malhado, A. C. M., Justino, F. B., Aguiar, R. G., & Costa, J. M. N. (2012). Modeling the photosynthetically active radiation in South West Amazonia under all sky conditions. **Theoretical and Applied Climatology**, 108, 631–640.

Alvalá, R. C. S., Gielow, R., da Rocha, H. R., Freitas, H. C., Lopes, J. M., Manzi, A. O., von Randow, C., Dias, M. A. F. S., Cabral, O. M. R., Waterloo, M. J. (2002) Intradiurnal and seasonal variability of soil temperature, heat flux, soil moisture content, and thermal properties under forest and pasture in Rondônia. **Journal of Geophysical Research**, 108 (D20).

Amorim, T. X.; Senna, M. C. A.; Cataldi, M. (2019). Impactos do desmatamento progressivo da Amazônia na precipitação do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, 24(15), 151 – 174.

Araújo, R. G., Andreoli, R. V., Candido, L. A., Kayano, M. T., & Souza, R. A. F. (2013). A influência do evento *El Niño*—Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. **Acta Amazonica**, 43(4), 469–480.

Araújo, R. C.; Ponte, M. X. (2016). Efeitos do desmatamento em larga-escala na hidrologia da bacia do Uraim, Amazônia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 9(07), 2390-2404.

Ballester, M. V. R., Victoria, D. D. C., Krusche, A. V., Victoria, R. L., & Richey, J. E. (2012). **LBA-ECO CD-06 Soil Classification Map, Ji-Parana River Basin, Rondonia, Brazil**. ORNL Distributed Active Archive Center.

Barbino, G. C. (2017). **Determinação do índice de área foliar por diferentes métodos e sua relação com o microclima em áreas de floresta e pastagem**. Monografia, Universidade Federal de Rondônia, Ji-Paraná, RO, Brasil.

Braghiere, R. K., Yamasoe, M. A., Rosário, N. M. E., Rocha, H. R., Nogueira, J. S., & Araújo, A. C. (2020). Characterization of the radiative impact of aerosols on CO₂ and energy fluxes in the Amazon deforestation arch using artificial neural networks. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 20(6), 3439–3458.

- Brum, M., Teodoro, G. S., Abrahão, A., & Oliveira, R. S. (2017). Coordination of rooting depth and leaf hydraulic traits defines drought-related strategies in the campos rupestres, a tropical montane biodiversity hotspot. **Plant and Soil**, 420(1), 467–480.
- Chambers, J. Q., & Artaxo, P. (2017). Biosphere-atmosphere interactions: Deforestation size influences rainfall. **Nature Climate Change**, 7(3), 175–176.
- Chen, J. M., & Black, T. A. (1992). Defining leaf area index for non-flat leaves. **Plant, Cell & Environment**, 15(4), 421–429.
- Cirino, G. G., Souza, R. A. F., Adams, D. K., & Artaxo, P. (2014). The effect of atmospheric aerosol particles and clouds on net ecosystem exchange in the Amazon. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 14(13), 6523–6543.
- Costa, M. H., Biajoli, M. C., Sanches, L., Malhado, A. C. M., Hutyrá, L. R., da Rocha, H. R., Aguiar, R. G., & Araújo, A. C. (2010). Atmospheric versus vegetation controls of Amazonian tropical rain forest evapotranspiration: Are the wet and seasonally dry rain forests any different? **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, 115(G4), G04021.
- Culf, A. D., Fisch, G., Malhi, Y., & Nobre, C. A. (1997). The influence of the atmospheric boundary layer on carbon dioxide concentrations over a tropical forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, 85(3–4), 149–158.
- Danelichen, V. H. de M., Biudes, M. S., Machado, N. G., Velasque, M. C. S., Silva, B. B., & Nogueira, J. S. (2016). Uso do Sensoriamento Remoto na Estimativa do Índice de Área Foliar em Floresta Tropical. **Ciência e Natura**, 38(3), 1352–1360.
- Danelichen, V. H. M., Velasques, M. C. S., MUSIS, C. R., Machado, N. G., Nogueira, J. S., & Biudes, M. S. (2014). Estimativas de índice de área foliar de uma pastagem por sensoriamento remoto no Pantanal Mato-grossense. **Ciência e Natura**, 36, 373–384.
- Fearnside, P. M. (2018). Brazil's Amazonian forest carbon: The key to Southern Amazonia's significance for global climate. **Regional Environmental Change**, 18(1), 47–61.
- Fernandes, T. D. (2017). **Estudo do microclima e das características da vegetação na Reserva Biológica do Jaru/RO**. Monografia, Universidade Federal de Rondônia, Ji-Paraná, RO, Brasil.
- Higuchi, N., Santos, J. dos, Lima, A. J. N., Higuchi, F. G., & Chambers, J. Q. (2011). A Floresta Amazônica e a Água da Chuva. **Floresta**, 41(3).
- Houborg, R., McCabe, M. F., & Gao, F. (2016). A Spatio-Temporal Enhancement Method for medium resolution LAI (STEM-LAI). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 47, 15–29.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. (2020). **A taxa consolidada de desmatamento por corte raso para os nove estados da Amazônia Legal (AC, AM, AP, MA, MT, PA, RO, RR e TO) em 2019 é de 10.129 km²**. http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=5465

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. (2016). **Condições de neutralidade no Pacífico Equatorial**. <http://enos.cptec.inpe.br/>

Intergovernmental Panel On Climate Change - IPCC. (2014). **Fifth Assessment Report—Synthesis Report**. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

Jacobsen, S.-E., Liu, F., & Jensen, C. R. (2009). Does root-sourced ABA play a role for regulation of stomata under drought in quinoa. **Scientia Horticulturae**, 122, 281–287.

Jiang, C., Ryu, Y., Fang, H., Myneni, R., Claverie, M., & Zhu, Z. (2017). Inconsistencies of interannual variability and trends in long-term satellite leaf area index products. **Global Change Biology**, 23(10), 4133–4146.

Jordão, W. H. C., Zanchi, F. B., Ferreira, D. M. M., Pagani, C. H. P., Luizão, F. J., Neves, J. R. D., & Duarte, M. L. (2015). Variabilidade do índice de área foliar em campos naturais e floresta de transição na região Sul do Amazonas. **Revista Ambiente & Água**, 10(2), 363–375.

Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R. G., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., Salomonson, V. V., Privette, J. L., Riggs, G., Strahler, A., Lucht, W., Myneni, R. B., Knyazikhin, Y., Running, S. W., Nemani, R. R., Wan, Z., Huete, A. R., Leeuwen, W. V., Wolfe, R. E., & Barnsley, M. J. (1998). The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 36(4), 1228–1249.

Kuwahara, F. A., & Souza, G. M. (2009). Fósforo como possível mitigador dos efeitos da deficiência hídrica sobre o crescimento e as trocas gasosas de *Brachiaria brizantha*. **Acta Scientiarum. Agronomy**, 31(2), 261–267.

Liang, S., Li, X., & Wang, J. (2012). **Advanced Remote Sensing** (1a ed.). Academic Press.

Ma, H., Liu, Q., Liang, S., & Xiao, Z. (2017). Simultaneous Estimation of Leaf Area Index, Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation, and Surface Albedo From Multiple-Satellite Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 55(8), 4334–4354.

Marenco, R. A., Antezana-Vera, S. A., Gouvêa, P. R. S., Camargo, M. A. B., Oliveira, M. F., & Santos, J. K. S. (2014). Fisiologia de espécies florestais da Amazônia: Fotossíntese, respiração e relações hídricas. **Revista Ceres**, 61, 786–799.

Marengo, J. A., & Espinoza, J. C. (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, 36(3), 1033–1050.

Marengo, J. A., Tomasella, J., Alves, L. M., Soares, W. R., & Rodriguez, D. A. (2011). The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, 38, L12703 (1–5).

Marengo, J. A., Tomasella, J., Soares, W. R., Alves, L. M., & Nobre, C. A. (2012). Extreme climatic events in the Amazon basin. **Theoretical and Applied Climatology**, 107(1–2), 73–85.

- Marques Filho, A. O., Dallarosa, R. G., & Pachêco, V. B. (2005). Radiação solar e distribuição vertical de área foliar em floresta—Reserva Biológica do Cuieiras ZF2, Manaus. **Acta Amazonica**, 35(4), 427–436.
- McDowell, N. G., Beerling, D. J., Breshears, D. D., Fisher, R. A., Raffa, K. F., & Stitt, M. (2011). The interdependence of mechanisms underlying climate-driven vegetation mortality. **Trends in Ecology & Evolution**, 26(10), 523–532.
- Niyogi, D., Chang, H. I., Saxena, V. K., Holt, T., Alapaty, K., Booker, F., Chen, F., Davis, K. J., Holben, B., Matsui, T., Meyers, T., Oechel, W. C., Pielke, R. A., Wells, R., Wilson, K., & Xue, Y. (2004). Direct observations of the effects of aerosol loading on net ecosystem CO₂ exchanges over different landscapes. **Geophysical Research Letters**, 31(20).
- Oliveira, M. A. (2014). **Caracterização da precipitação em área de floresta e pastagem no Sudoeste da Amazônia**. Monografia, Universidade Federal de Rondônia, Ji-Paraná, RO, Brasil.
- Oliveira, P. H. F., Artaxo, P., Pires, C., Lucca, S. D., Procópio, A., Holben, B., Schafer, J., Cardoso, L. F., Wofsy, S. C., & Rocha, H. R. (2007). The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO₂ flux in Amazonia. **Tellus B: Chemical and Physical Meteorology**, 59(3), 338–349.
- Oliveira, R. S., Dawson, T. E., Burgess, S. S., & Nepstad, D. C. (2005). Hydraulic redistribution in three Amazonian trees. **Oecologia**, 145(3), 354–363.
- ORNL DAAC. 2018. MODIS and VIIRS Land Products Global Subsetting and Visualization Tool. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1379>
- Pires, G. F., & Costa, M. H. (2013). Deforestation causes different subregional effects on the Amazon bioclimatic equilibrium. **Geophysical Research Letters**, 40(14), 3618–3623.
- Rodrigues, C. O. D. (2012). **Relações luminosas e desempenho do capim-braquiária em sistema agrossilvipastoril**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, MG, Brasil.
- Ruezzene, C. B., Aguiar, R. G., Svierzoski, N. D. S., Castro, B. S., Barbino, G. C., & Webler, A. D. (2018). Índice de Área Foliar e Biomassa pelo Método Direto em uma Área de Pastagem na Amazônia Ocidental. In: Andrade, N. L. R., Aguiar, R. G., Orozco, M. M. D., Fotopoulos, I. G., Ruezzene, C. B. (Org.). **Estudos Ambientais em Território Amazônico sob a Perspectiva da Engenharia Ambiental**. (1ed). Curitiba: Appris, 2018, v. 1, p. 119-127.
- Ruhoff, M. E. (2011). **Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Rummel, U., Ammann, C., Gut, A., Meixner, F. X., & Andreae, M. O. (2002). Eddy covariance measurements of nitric oxide flux within an Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 107(D20), 8050.
- Scholz, F. G., Bucci, S. J., Goldstein, Meinzer, F. C., & Franco, A. C. (2002). Hydraulic redistribution of soil water by neotropical savanna trees. **Tree Physiology**, 22, 603–612.

Senna, M. C. A., Costa, M. H., & Pires, G. F. (2009). Vegetation-atmosphere-soil nutrient feedbacks in the Amazon for different deforestation scenarios. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 114(D4).

Silva Dias, M. F. A. (2014). Eventos extremos climáticos. **Revista USP**, 103, 33–40.

Sullivan, M. J. P., Lewis, S. L., Affum-Baffoe, K., Castilho, C., Costa, F., Sanchez, A. C., Ewango, C. E. N., Hubau, W., Marimon, B., Monteagudo-Mendoza, A., Qie, L., Sonké, B., Martinez, R. V., Baker, T. R., Brienen, R. J. W., Feldpausch, T. R., Galbraith, D., Gloor, M., Malhi, Y., & Phillips, O. L. (2020). Long-term thermal sensitivity of Earth's tropical forests. **Science**, 368(6493), 869–874.

Tao, X., Liang, S., He, T., & Jin, H. (2016). Estimation of fraction of absorbed photosynthetically active radiation from multiple satellite data: Model development and validation. **Remote Sensing of Environment**, 184, 539–557.

von Randow, C., Manzi, A. O., Kruijt, B., Oliveira, P. J., Zanchi, F. B., Silva, R. L., Hodnett, M. G., Gash, J. H. C., Elbers, J. A., Waterloo, M. J., Cardoso, F. L., & Kabat, P. (2004). Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, 78(1), 5–26.

Wang, T., Xiao, Z., & Liu, Z. (2017). Performance evaluation of machine learning methods for leaf area index retrieval from time-series MODIS reflectance data. **Sensors (Switzerland)**, 17(1).

Wu, J., Lakshmi, V., Wang, D., Lin, P., Pan, M., Cai, X., Wood, E. F., & Zeng, Z. (2020). The Reliability of Global Remote Sensing Evapotranspiration Products over Amazon. **Remote Sensing**, 12(14), 2211.

Zanchi, F. B., Waterloo, M. J., Aguiar, L. J. G., von, R., Kruijt, B., Cardoso, F. L., & Manzi, A. O. (2009). Estimate of the Leaf Area Index (LAI) and Biomass in pasture in the state of Rondônia—Brazil. **Acta Amazonica**, 39(2), 335–348.