

Análise de série temporal da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (fPAR) em diferentes fitofisionomias da bacia Amazônica

Pietro de Almeida Cândido¹
Nelson de Almeida Gouveia¹
Milton Kampel¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{pietro.candido, nelson.gouveia, milton.kampel}@inpe.br

Abstract. Many factors influence the study of canopy reflectance which is one of the fundamental concepts of remote sensing. The MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) is the primary instrument in the NASA Earth Observing System for monitoring the seasonality of global terrestrial vegetation. The MODIS Land Science Team for the global terrestrial surface using a production efficiency approach operationally produces estimates of 8-day mean daily Fractional Photosynthetically Active Radiation (fPAR) at 1 km spatial resolution. fPAR is the capacity of a canopy absorbing energy. It is also a state variable in hydrological, ecological, biogeochemical and crop-yield models. The fPAR index is indicative of the status and evolution of plant cover. The present work has the aim of studying seasonal and interannual variability of phytophysiognomies of the Amazon rainforest using MOD15A2 fPAR time series. A positive interference condition is observed when correlating precipitation with fPAR, but also, with a negative interference with the continuity of rain making the correlation values between these variables low and non-significant. However, the cause-effect relationship between precipitation and fPAR is notorious. The time series analyzed also allowed the identification of drought phenomenon. The MOD15A2 time-series analyzes results are useful for the environmental monitoring of the natural resources in the three analyzed regions.

Palavras-chave: análise de séries temporais, ondaletas, fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida, fPAR, MOD15A2, Amazônia, fitofisionomias, time-series analyzes, wavelets, fraction of photosynthetically active radiation, fPAR, MOD15A2, Amazone, .phytophysiognomies.

1. Introdução

O estudo da reflectância de dosséis vegetais é um dos conceitos fundamentais quando se trabalha com o sensoriamento remoto aplicado a vegetação. Um conjunto de fatores influi no estudo da reflectância de dosséis, tais como: o índice de área foliar, as propriedades de reflectância dos solos abaixo do dossel, a quantidade de luz direta e/ou difusa incidente no dossel, a distribuição de ângulo foliar e a geometria de aquisição de imagens (Jensen, 2007). Estes fatores analisados de forma separada, ou em modelos complexos, são chaves para a extração de informações sobre o estado de desenvolvimento dos dosséis e suas mudanças.

O fPAR (sigla em inglês para 'fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida') expressa a capacidade de absorção de energia de um dossel. Esta é uma variável biofísica e está diretamente relacionada com a produtividade primária da fotossíntese. O índice fPAR, também, pode ser usado como um indicador do estado e evolução da cobertura vegetal. Atualmente, existem alguns produtos de sensoriamento remoto que geram o índice derivados de sensores como o *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) e o *MODerate resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS).

O sensor MODIS, a bordo dos satélites AQUA e TERRA, foi desenvolvido com o objetivo de monitorar a atmosfera, oceano e a superfície terrestre. Ao todo são 36 bandas e resolução radiométrica de 12 bits, fornecendo imagens em uma resolução espacial de 250m a 1km. Seu sistema de varredura é versátil, com um espelho escaneador de movimento cruzado, coletor ótico e um conjunto de arranjos lineares com filtros de interferência espectral localizados em quatro planos focais (Justice, 1998; Ponzoni e Shimabukuru, 2007). Nos últimos anos o sensor MODIS se consolidou como uma fonte contínua e regular para a obtenção de dados da superfície terrestre, promovendo o monitoramento sistemático de todo o

globo. A partir dos dados MODIS, foram desenvolvidos e implantados algoritmos para a geração de produtos operacionais que auxiliam no monitoramento da superfície terrestre (Justice, 1998).

O produto MODIS MOD15 contém os índices LAI (*Leaf area index*) e o fPAR, além de arquivos de qualidade do dado. O MOD15A2, disponível na plataforma Ladsweb da NASA (<ftp://ladsweb.nascom.nasa.gov/>), tem resolução temporal de 8 dias e espacial de 1km.

O algoritmo para estimativa do fPAR é baseado na teoria de transferência radiativa tridimensional que é otimizada por inversão usando tabelas de referência e aproximações sofisticadas para resolver a equação de transporte radiativo (Myneni *et al*, 2002). Utiliza ainda, os produtos de reflectância da superfície (MOD09), cobertura do solo (MOD12) e nuvens (MOD09) como dados de entrada no modelo. Quando esse método falha ao localizar uma solução, um algoritmo reserva é utilizado baseado nas relações entre o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e a fPAR (Fensholt, 2004; Myneni *et al*. 2002; knyazikhin *et al*. 1999).

Com a ampla divulgação e utilização por diferentes tipos de usuários, os produtos MODIS produzidos de forma operacional e em escala global devem ser validados em diferentes biomas, localização e condições de radiação. Desta forma, o presente trabalho tem por objetivo estudar o comportamento de fitofisionomias do Bioma Amazônia por meio de séries temporais da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (produto MOD15A2), observando os padrões de comportamento sazonal e interanual. O fPAR foi correlacionado com a produção primária bruta (GPP), precipitação e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). (complete a frase com uma breve explicação do pq fez essas correlações? Ou deixe em aberto e no texto a seguir tenta explicar melhor)

1. MATERIAIS E MÉTODOS

1.1. Área de Estudo

Foram selecionadas três fitofisionomias no domínio Amazônico contidas no *Tile-MODIS V09H11*. A seleção das fitofisionomias foi estabelecida com o auxílio da delimitação de unidades de conservação de proteção integral, diminuindo a probabilidade de interferências antrópica no estado biofísico da cobertura vegetal (Figura 1). As unidades de conservação estão inseridas no Estado do Amazonas, sendo duas federais, a Estação Ecológica Juami-Japura e o Parque Nacional dos Campos Amazônicos; e uma estadual, o Parque Estadual do Rio Negro – Setor Norte.

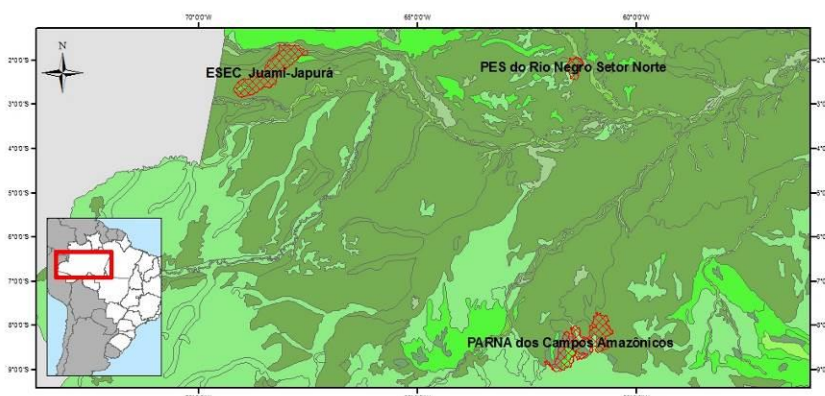


Figura 1. Localização da área de estudo. Fonte: Autor

Na Tabela 1 a seguir estão expostas as fitofisionomias predominantes em cada unidade de conservação, segundo IBGE (1992). Na ESEC Juami-Japurá há o predomínio da Floresta Ombrófila Densa que se caracteriza por elevadas temperaturas e alta precipitação, bem distribuídas durante o ano. No PES Rio Negro ocorre a Campinara, com baixa produtividade,

localizada sobre solos com baixa disponibilidade de nutrientes e sujeita à saturação do solo por água e/ou alagamentos periódicos. O PARNA Campos Amazônicos caracteriza-se pela presença de enclave de Cerrado, sendo uma vegetação relictual, remanescente de climas anteriores.

Tabela 1. Descrição das fitofisionomias analisadas no domínio Amazônico. Fonte: IBGE, 1992.

Unidade de Conservação	Fitofisionomia	Descrição
ESEC Juami-Japurá	Floresta Ombrófila Densa	Constituída por árvores que variam de médio a grande porte com gêneros característicos e estrato superior fechado.
PES Rio Negro – Setor Norte	Campinaria	Vegetação restrita às áreas do alto Rio Negro, vegetação arbórea fina sobre solo pobre em nutrientes e minerais.
PARNA Campos Amazônicos	Savana	Apresenta árvores baixas e tortuosas, isoladas ou agrupadas sobre gramíneas.

1.2. Banco de Dados Utilizado

As séries temporais de fPAR são do produto MOD15A2 com resolução temporal de oito dias e espacial de 1 km. Foram coletados todos os dados disponíveis entre os anos de 2004 a 2014. As análises de correlação utilizaram os anos de 2009 a 2011, sendo o GPP contido no produto MOD17A2 e o MOD13A2 com dados de NDVI, o primeiro de 8 dias e o segundo com 16 dias de resolução temporal, ambos com a resolução espacial de 1 km. Todos os dados são distribuídos pela plataforma Ladsweb da NASA. Foram também utilizados arquivos de precipitação adquiridos pelo *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) da NASA.

1.3. Análise de Séries Temporais

Para atingir os objetivos propostos foram aplicadas diferentes técnicas de análise de séries temporais nos conjuntos de dados. A primeira parte foi analisar a correlação entre produtos derivados de modelos que utilizam o fPAR para geração de novos parâmetros. Neste caso foi escolhido o GPP (MOD17), e fatores que influem na estimativa do fPAR, tal como a precipitação, além da correlação do fPAR com NDVI.

Para a análise do comportamento sazonal e interanual do fPAR em diferentes tipos de fitofisionomias foi aplicada a transformada Wavelet (Torrence e Compo, 1998).

A transformada Wavelet será utilizada para analisar os padrões de comportamento do fPAR em diferentes tipos de vegetação da Amazônia em escalas sazonal e interanual. A técnica foi aplicada através da plataforma *online Interactive Wavelet Plot*, desenvolvida pela Exelisvis. Esta aplicação demonstra o uso da transformada Wavelet contínua para análise de séries temporais. A transformada Wavelet decompõe uma série temporal unidimensional para o espaço tempo-frequência bidimensional.

1.3.1. Correlações

O produto MOD17A2 é um composto acumulado de valores GPP baseado no conceito de eficiência na utilização de radiação que é potencialmente utilizada como insumo para modelos de dados para calcular a energia terrestre, carbono, processos do ciclo da água e biogeoquímica da vegetação. O modelo do MOD17A2 toma como entradas o fPAR, o Índice de Área Foliar, e produtos MODIS de cobertura da terra, bem como temperatura, radiação solar, e déficit de vapor de água obtida a partir de diferentes conjuntos de dados da NASA, além de dados meteorológicos e de nuvens.

2. Resultados e Discussão

2.1. Correlações do fPAR com NDVI e GPP

Para avaliar a relação do fPAR como dado de entrada para o modelo de geração do GPP (MOD17) foi realizada uma correlação simples de Pearson. Constatou-se um alto coeficiente de determinação, com média de $r^2=0,71$, nas três regiões analisadas. Os índices NDVI e fPAR demonstram um alto coeficiente de determinação, com média de $r^2=0,9$ para regiões com alta densidade de folhas nos dosséis e $r^2=0,76$ para a região de Savana. Nos dados do PES Rio Negro observou-se um ruído, sendo potencialmente ocasionado pela presença de água em épocas de cheia nesta fitofisionomia.

2.2. fPAR e Precipitação

No PARNA Campos amazônicos, fitofisionomia Cerrado, ocorreu uma baixa correlação entre os dados de precipitação e fPAR. A Figura 2 apresenta os valores de média, desvio padrão (DV), mínimo (Min), máximo (Max) e amplitude de variação (Amp.) para fPAR e precipitação, bem como, o comportamento destes ao longo do ano.

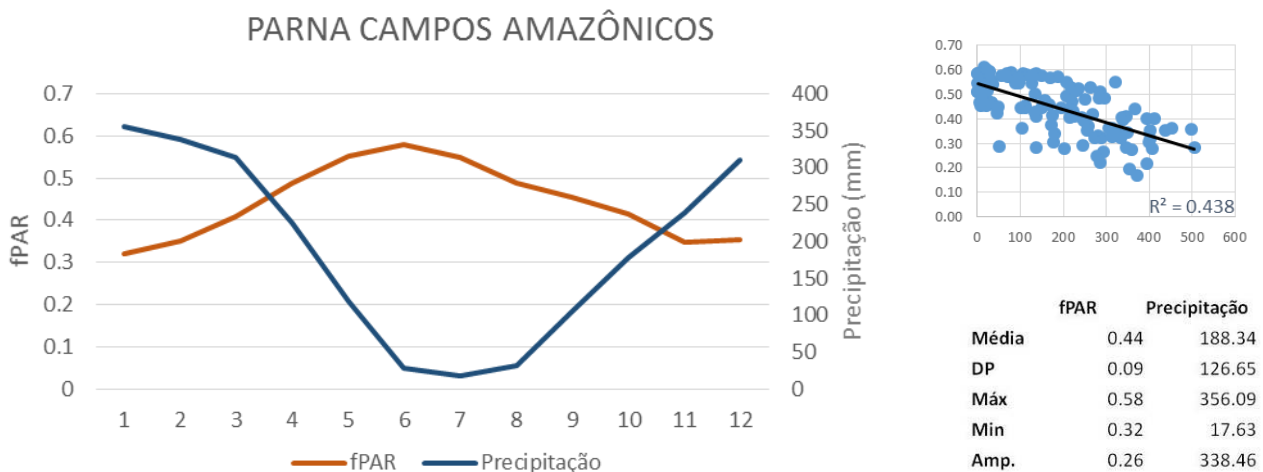


Figura 2. Médias mensais temporais (2004-2014) do fPAR e precipitação, correlação (2009-2011) e estatísticas para o PARNA Campos Amazônicos.

O mês mais chuvoso ocorre entre dezembro e março, com média de 325 mm/mês neste período e média mensal anual de 188 mm. O fPAR, para esta região, tem seu pico entre junho e julho, ou seja, 3 meses após o fim dos meses mais chuvosos, mostrando que com a diminuição das chuvas a atividade da vegetação aumenta, mas a persistência de pouca chuva faz os valores de fPAR diminuírem.

A Figura 3 apresenta a correlação e as séries temporais da precipitação e fPAR para a região da ESEC Juami-japura, fitofisionomia Floresta Ombrófila Densa.

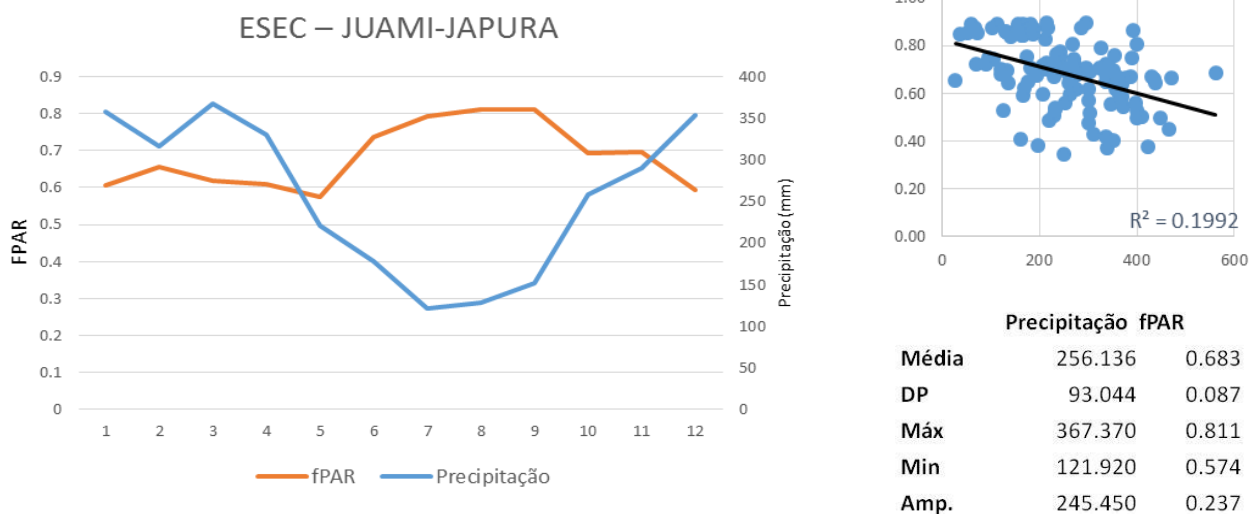


Figura 3. Médias mensais temporais (2004-2014) do fPAR e precipitação, correlação (2009-2011) e estatísticas para a ESEC Juami-Japura.

Os meses mais chuvosos vão de dezembro a abril, com média de 525 mm/mês no período e média anual de 256 mm. Os meses de maior intensidade de fPAR vão de junho a setembro, com uma amplitude de variação de 0,24. Segundo Oliveira (2008), o período contínuo de acúmulo de água no solo e de altas concentrações de vapor de água na atmosfera contribui para a queda na atividade da vegetação. Como esta região não sofre de déficit hídrico, mantém altas concentrações de umidade e a amplitude do fPAR é menor.

Na Figura 4 são apresentados os valores médios mensais de fPAR e precipitação, além de estatísticas e correlação para o PES Rio Negro - Setor Norte, fitofisionomia de Campinaria.

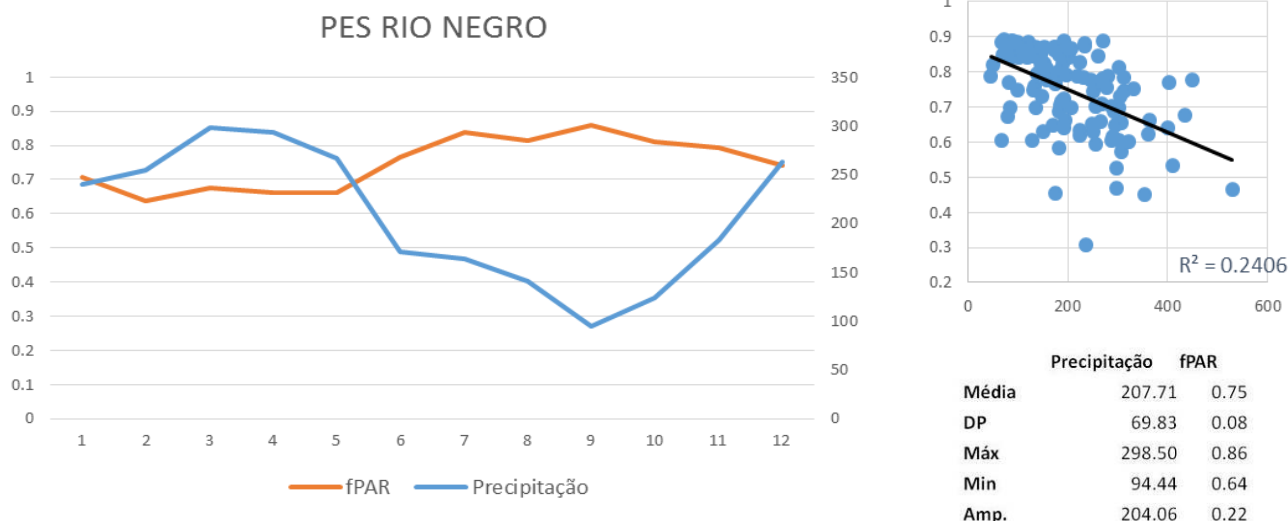


Figura 4. Médias temporais mensais de fPAR e precipitação (2004-2014), correlação (2009-2011) e estatísticas para o PES Rio Negro - Setor Norte.

Esta região, na margem do Rio Negro, apresenta máximas de precipitação entre dezembro e maio, com média anual de 207 mm. Os maiores valores de fPAR são observados entre julho e dezembro e os menores valores ocorrem no período mais chuvoso, entre fevereiro e maio.

2.3. Análise Temporal – 2004 a 2014

Os valores de fPAR apresentam ciclos anuais, com altos valores no meio do ano, período de inverno e diminuição da precipitação na Amazônia. Valores mais baixos ocorrem entre o fim e começo de ano, estação chuvosa e quente na Amazônia. A amplitude dos períodos de alta e baixa varia conforme a fitofisionomia estudada. Na Tabela 2 são apresentados os valores de média, desvio padrão, máximo, mínimo e amplitude para cada região analisada.

Tabela 2. Estatísticas das séries temporais (2004-2014) de valores de fPAR para as três regiões fitofisionômicas na Amazônia.

	PARNA - Campo	PES – Rio Negro	ESEC Juami- Japurá
Média	0,44	0,75	0,68
Desv.P	0,11	0,11	0,14
Máx	0,61	0,89	0,89
Min	0,15	0,31	0,35
Amp.	0,46	0,58	0,55

A região de Savana foi a que apresentou menores valores de média, máximo e mínimo de fPAR, devido a características fitofisionômicas com menos concentração de vegetação em copas e com um período seco mais rigoroso, comparado com as outras regiões.

Com copas densas e sempre verdes, as regiões de Floresta Ombrófila Densa e Campinarana apresentaram os maiores valores médios de fPAR, devido à proporção grande de clorofila o ano todo, principal pigmento absorvedor da radiação no visível. Com o diferencial da maior amplitude de variação para a Campinaria, onde, segundo Oliveira (2008), ocorre a influência de presença ou ausência dos estratos e a estrutura do substrato ocupado na variação da fPAR, comunidades vegetais com sistema radicular pouco profundo ou ocupando solos menos estruturados, mostram maior influência na absorção da radiação de variações ambientais de curto prazo.

Para analisar a sazonalidade e o comportamento interanual foi realizada a transformada Wavelet em cada região analisada. Na Figura 5 são apresentados os resultados da aplicação da análise de série temporal para o PES Rio Negro.

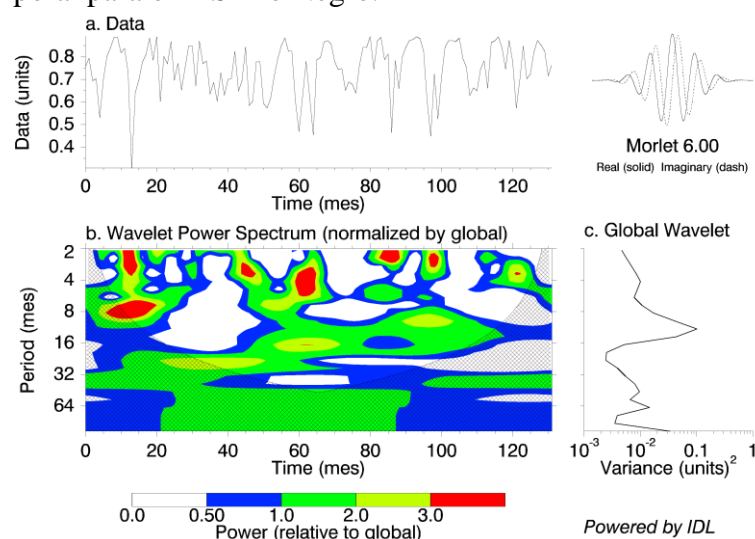


Figura 5. Série temporal (2004-2014) e espectro de potência de fPAR do PES Rio Negro.

Na figura 5, constata-se o predomínio de uma sazonalidade anual, esta sendo a mais predominante na série, mesmo com uma estabilidade entre os meses 20 e 60 (ago/2005 a dez/2008). Segundo o trabalho realizado por Oliveira (2008), a Campinarana apresenta maiores variações sazonais e interanuais, pois este tipo de vegetação encontra-se sobre solos menos estruturados, composta por nanofanerófitos finos, mostrando maior susceptibilidade às

variações ambientais. Nesta série, em especial, observa-se pontos críticos, com ciclos de 2 a 8 meses, ambos nos períodos secos de 2005, 2007, 2009, 2010 e 2012. Os três primeiros anos são caracterizados pela ocorrência de El Niño moderado e fraco, podendo explicar a queda do valor da fPAR, já que esta vegetação é dependente do Rio Negro.

A figura 6, a seguir, apresenta o comportamento sazonal e interanual da fitofisionomia de Floresta Ombrofila Densa.

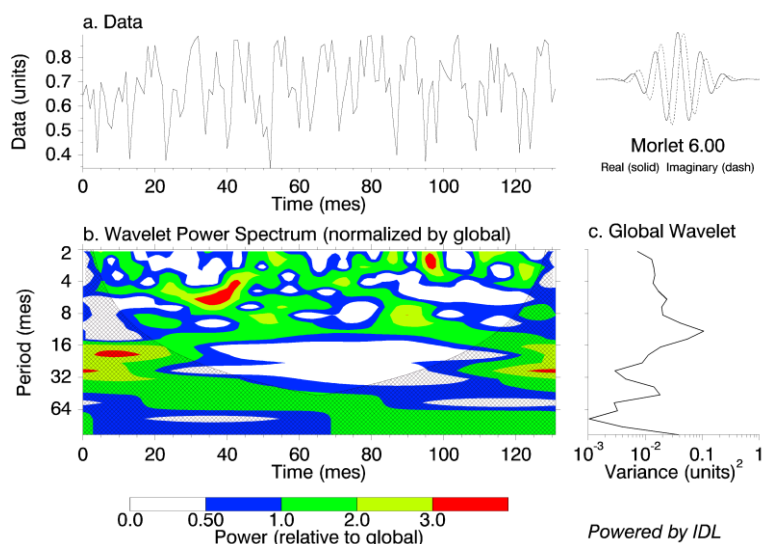


Figura 6. Comportamento sazonal e interanual dos pontos para a ESEC Juami-Japura

Na Figura 6, observa-se a predominância do ciclo anual de 12 meses, mas com sinal de queda de fPAR de 6 meses entre o meio do ano de 2006 e começo de 2008, e outro menor de 2 meses no início de 2012.

A figura 7, a seguir, observa-se os dados do PARNA Campos Amazônicos.

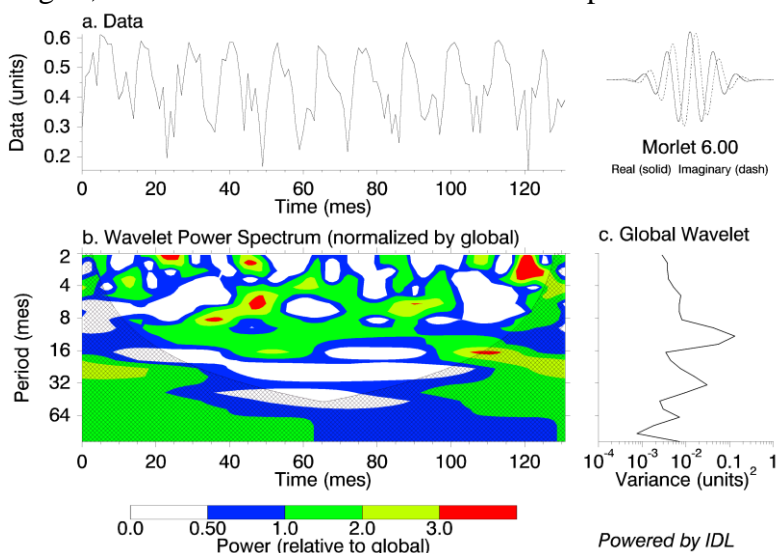


Figura 7. Comportamento sazonal e interanual dos pontos para o PARNA Campos Amazônicos

No PARNA Campos Amazônicos (Figura 7), três principais pontos críticos são observados. O primeiro no início de 2006, o segundo no meio do ano de 2007 e o último no início de 2014. Em 2014 foi registrado o recorde de focos de calor no PARNA, com 1150 focos, superando o último recorde de 270 focos em 2012. Diferentes fatores influem nos pontos críticos, mas a maioria das vezes observou-se períodos de seca e eventos extremos nas regiões analisadas. Deve-se ampliar a análise temporal para se ter uma melhor visão dos

eventos que efetivamente interferem no fPAR MODIS, complementada com dados de campo para a validação do produto de satélite.

3. Considerações Finais

As análises realizadas se mostraram úteis para compreender o comportamento da fPAR no bioma Amazônico e em suas diferentes fitofisionomias. Tal como analisou Oliveira (2008) e Xiao et al, (2005), a água interfere na resposta espectral do fPAR, tornando-o mais baixo pela sua peculiar absorção, e com maior vigor após a chuva. O fPAR atinge valores mais altos quando a concentração de vapor de água na atmosfera diminui e maiores quantidades de radiação atingem a vegetação facilitando o desenvolvimento normal de processos fisiológicos. Essa condição de interferência positiva da precipitação na fPAR com alternância para interferência negativa em situações de excesso de chuva, faz com que os valores de correlação entre estas variáveis sejam baixos e não significativos. Porém, a relação de causa-efeito entre a precipitação e fPAR é notória.

As análises de séries temporais de diferentes fitofisionomias do bioma Amazônia facilitaram a interpretação do comportamento sazonal e interanual do índice. Fenômenos de seca foram os principais fatores para pontos críticos nas séries temporais, não sendo possível constatar a presença de El Niño ou La Niña devido a limitações das séries de dados. Mesmo assim, foi possível observar possíveis relações com estes eventos climáticos.

Os trabalhos que são gerados a partir dos produtos MOD15 demonstram a importância e ampliam as aplicações dos índices analisados, principalmente, quando analisados e comparados com dados provenientes de outros sensores e a necessidade de validar os dados MODIS em diferentes métodos de coleta de dados.

Agradecimentos

A agência CAPES pela bolsa durante o mestrado e aos colegas da equipe de trabalho no INPE. Aos bancos de dados abertos MODIS/NASAS e as plataformas de softwares livres utilizados.

4. Referências

- Alves, d. S. Gross Primary Production Variability in the Amazon River Basin based on 2009-2011 MOD17A2 MODIS data. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. Brasil. 2015.
- Fensholt, R. Sandholt, I. Rasmussen, M. S. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment* 91. 490-507. 2004.
- IBGE. Manual Técnico da Vegetação Brasileira, Rio de Janeiro, IBGE, Série Manuais Técnicos em Geociências, número 1, 92 p. 1992.
- Myneni, r. B. et al. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 83, 214– 231. 2002.
- Oliveira, L. M. T. Estudo das regiões fitoecológicas brasileiras pela FAPAR/NDVI e relações com séries temporais de dados pluviométricos. Tese (D.Sc. Ciências Atmosféricas em Engenharia) Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro. 2008.
- Torrence, C. e Compo, G.P. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Met. Soc.*, 79(1), 61-78. 1998.
- Xiao, X., Zhang, Q., Saleska, S., Hutyrá, L., Camargo, P., Wofsy, S., Frohling, S., Boles, S., Keller, M., Moore, B. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest, *Remote Sensing of Environment*, v.94, pp. 105–122. 2005.