



CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DA COBERTURA VEGETAL COM BASE EM SÉRIE TEMPORAL NDVI/MODIS NA RESERVA DO NIASSA - MOÇAMBIQUE

*Phenological Characterization of Vegetation Cover based on Time Series of NDVI
/MODIS, in Niassa Reserve-Mozambique*

**Eufrásio João Sozinho Nhongo¹, Denise Cibys Fontana¹,
Laurindo Antonio Guasselli¹ & Júlio César Dalla Mora Esquerdo²**

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto
Avenida Bento Gonçalves 9500 - 91501-970 - Porto Alegre - RS, Brasil
eufraionhongo@yahoo.com, {dfontana, laurindo.guasselli}@ufrgs.br

²Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA

Embrapa Informática Agropecuária
Caixa Postal 6041 – 13083-886 – Campinas – SP, Brasil
julio.esquerdo@embrapa.br

Recebido em 28 de Junho, 2017/ Aceito em 7 de Outubro, 2017

Received on June 28, 2017/ Accepted on October 7, 2017

RESUMO

A Reserva do Niassa é uma das maiores áreas de conservação do mundo de Florestas de Miombo. Todos os anos há recorrência de incêndios antropogênicos na estação seca. Estudos sobre a caracterização fenológica e a influência dos incêndios nesta fitofisionomia são ainda incipientes. Assim sendo, esta pesquisa teve como objetivo caracterizar a fenologia da cobertura vegetal da Reserva do Niassa com base em séries temporais de NDVI/ MODIS e relacioná-las com regiões homogêneas. Inicialmente, as séries temporais, entre 2001 a 2015, foram suavizadas pelo filtro Savitzky-Golay disponível no programa TIMESAT. As imagens médias foram classificadas, com base em k-médias, e extraídos o perfil espectro-temporal para o período de análise. Posteriormente, foram extraídas as métricas fenológicas: Início e Fim do ciclo, Duração do ciclo, Mínima atividade fotossintética, Máxima atividade fotossintética, Amplitude, Taxa de rebrota, Taxa de senescência, Produtividade total e Produtividade sazonal. Com base nos resultados, observou-se que as regiões homogêneas obtidas representam os principais grupos de cobertura vegetal da Reserva do Niassa, as quais são marcadas por forte sazonalidade. Áreas com ocorrência de Floresta Decídua e Aberta Semi-decídua apresentam padrão fenológico diferenciado de Florestas de Montanha e Florestas Ribeirinha e Matagal. Existe, portanto, um padrão fenológico típico e distinto entre as regiões homogêneas, o qual está relacionado a condições climáticas da região, podendo ser caracterizado a partir de série temporal NDVI do sensor MODIS.

Palavras-chave: Métricas Fenológicas, Regiões Homogêneas, Índice de Vegetação, Perfil Espectro-temporal.

ABSTRACT

The Niassa Reserve is one of the largest conservation areas in the world of Miombo Forests. Every year there is a recurrence of anthropogenic fires during the dry season. Studies on the phenological characterization and the influence of the fires in this phytophysiology are still incipient. Thus, this research aimed to characterize the phenology of the

vegetation cover of the Niassa Reserve based on time series of NDVI / MODIS and to relate them with homogeneous regions. Initially, the 2001-2015 time series was smoothed by the Savitzky-Golay filter available in the TIMESAT program. The average images were classified, based on k-means, and temporal profiles were extracted for this period of analysis. Afterwards, the following phenological metrics were extracted: Start and End of the cycle, Cycle duration, Minimum photosynthetic activity, Maximum photosynthetic activity, Amplitude, Regrowth rate, Senescence rate, Total productivity and Seasonal productivity. Based on the results, it was observed that the homogeneous regions obtained represented the main plant groups of the Niassa Reserve, which are marked by strong seasonality. Areas with Deciduous and Semi-deciduous Open Forest present different phenological patterns of Mountain Forests and Riverine and Scrubland Forests. There is, therefore, a typical and distinct phenological pattern among the homogeneous regions, which is related to the climatic conditions of the region and can be characterized by the NDVI time series of the MODIS sensor.

Keywords: Phenological Metrics, Homogeneous Regions, Vegetation Index, Spectral-temporal Profile.

1. INTRODUÇÃO

A fenologia é o estudo da ocorrência de eventos biológicos repetitivos e das causas de sua ocorrência em relação às forças seletivas bióticas e abióticas e da inter-relação entre as fases caracterizadas por estes eventos, dentro de uma mesma ou de várias espécies (LIETH, 1974; CLELAND *et al.*, 2007; HAGGERTY & MAZER, 2008).

Este sincronismo de eventos denominados de fenofases, como o brotamento e a queda de folhas, a floração e a frutificação, fornecem dados que permitem a análise da dependência das fenofases com fatores bióticos e abióticos (ALMEIDA & ALVES, 2000; NEVES *et al.*, 2010). Este ciclo marcado pela sazonalidade é influenciado pelo fotoperíodo, precipitação pluvial, temperatura do ar, radiação solar, tipo de solo, entre outros fatores ambientais (GU *et al.*, 2010). Portanto, mudanças nos fatores ambientais podem resultar na mudança do período e duração destes eventos fenológicos.

Nesta perspectiva, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos na caracterização da fenologia vegetal em escalas regionais, continentais e globais. Este conhecimento tem sido útil no entendimento da dinâmica dos ecossistemas florestais (MANTOVANI *et al.*, 2003), na recuperação de áreas degradadas, na gestão de unidades de conservação (SOUZA *et al.*, 2014), na modelagem de superfície terrestre, no estudo de mudanças climáticas (BROICH *et al.*, 2014, HUAN *et al.*, 2015) e até mesmo na previsão de perigo de incêndios (ROADS *et al.*, 2005; BAJOCCO *et al.*, 2015).

Contudo, como os dados fenológicos de campo são morosos, onerosos e pontuais, fornecendo apenas informações sobre a

variabilidade espacial no momento dos eventos fenológicos, estimativas a partir de observações de sensores abordo de satélite têm sido os métodos mais utilizados pelos cientistas para estudar a variabilidade fenológica da vegetação (SOUDANI *et al.*, 2012; ARANTES, 2015; MELAAS *et al.*, 2013).

Os estudos denominados de fenologia da superfície terrestre (LPS do inglês Land Phenology Surface) se referem, portanto, a disponibilização de informações quanto ao desenvolvimento espaço-temporal da superfície vegetal detectada pelos sensores remotos (De BEURS & HENEERY, 2004; WHITE & NEMANI, 2006). Destacam-se nestes estudos o uso de séries temporais do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI do inglês Normalized Difference Vegetation Index) e do Índice de Vegetação Realçado (EVI do inglês Enhanced Vegetation Index). Ambos índices podem ser obtidos do sensor MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), que fornece dados para monitorar a dinâmica dos ecossistemas com resoluções espaciais e temporais compatíveis e propriedades geométricas e radiométricas melhoradas (ZHANG *et al.*, 2006).

Entretanto, deve ser considerado que o grande desafio na geração de informações fenológicas com sensores deste tipo é reduzir as incertezas inerentes aos próprios sistemas sensores, mas também à aquisição e ao processamento dos dados coletados (TELES, 2015). Existem ainda dificuldades relacionadas à validação dos dados orbitais com observações terrestres, em função dos atributos temporais e espaciais das imagens. Frequentemente as imagens utilizadas são composições, formadas pela melhor observação dentro de um período (i.e. 8-dias, 16-dias ou

outra) e apresentam resolução espacial moderada (250m a 1000m), o que leva a misturas na resposta espectral da vegetação (ARANTES, 2015).

Diversos métodos têm sido utilizados para extração de métricas fenológicas destas imagens, os quais podem ser divididos em: limiares (threshold), derivadas (derivated), algoritmos de suavização (smothing algorithms) e modelos matemáticos (model fit) (YOU *et al.*, 2013; ARANTES, 2015). Já as métricas mais frequentemente extraídas têm sido: Taxa de rebrota, Taxa de senescência, produtividade total e sazonal, valores do mínimo e máximo, comprimento e amplitude alcançados no início, meio e fim das estações, entre outras.

Especificamente com o sensor MODIS, entre os estudos relevantes que têm utilizado as séries temporais de NDVI para o estudo da fenologia da superfície terrestre pode-se apontar: Gu *et al.* (2010), El Vilaly (2013), Dugarsuren & Lin (2016), Bohovic *et al.* (2016) e Streher *et al.* (2017).

Contudo, são escassos os trabalhos com esse enfoque desenvolvidos em Moçambique,

sobretudo na Reserva do Niassa. Esta é uma área com rica diversidade de flora e fauna, constituindo em uma das maiores áreas de conservação de Florestas de Miombo do mundo. Segundo Ribeiro *et al.* (2008), o fogo e os elefantes são os principais fatores ecológicos dentro da reserva. Na estação seca, (agosto-outubro) há ocorrência de incêndios antropogênicos, com maior incidência na parte leste da reserva (TIMBERLAKE *et al.*, 2004; RIBEIRO *et al.*, 2008). Em relação aos elefantes, estas são as espécies predominantes na reserva (CRAIG *et al.*, 2009)

Nesta perspectiva, este trabalho teve como objetivo principal, caracterizar a fenologia da cobertura vegetal, com base em séries temporais de NDVI do sensor MODIS e relacioná-las com regiões homogêneas, na Reserva do Niassa – Moçambique.

2. MATERIAL E MÉTODO

Nesta secção são descritas as características fisiográficas e climáticas da área de estudo, bem como os dados utilizados e os procedimentos metodológicos adotados para alcançar os objetivos deste estudo.

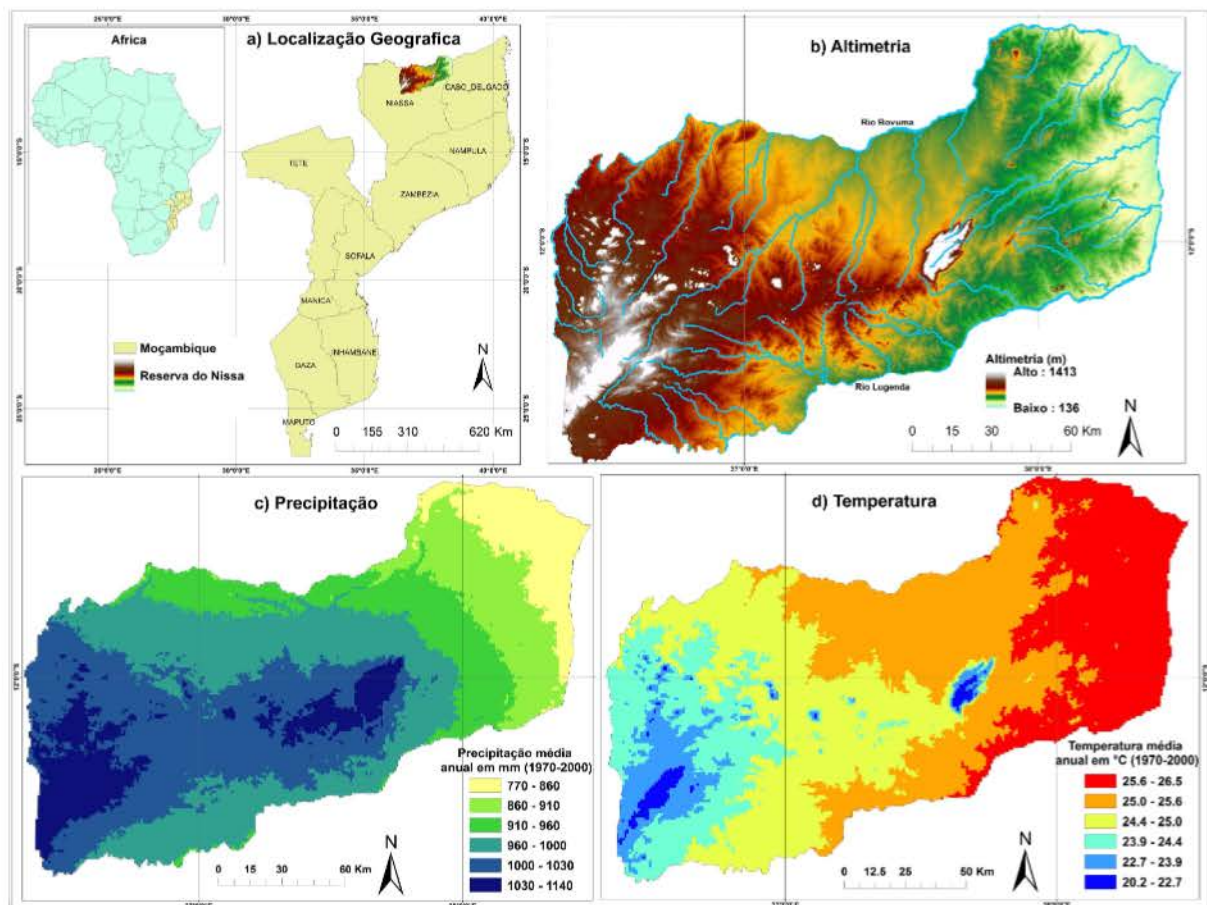


Fig. 1 - Localização Geográfica da Reserva do Niassa (a); Altimetria (b); Precipitação (c) e Temperatura (d).

2.1 Área de estudo

A Reserva do Niassa localiza-se a norte de Moçambique entre os paralelos 11° 24' 40,40" e 13° 12' 51,86" sul, e meridianos 35° 48' 11,48" e 38° 52' 46,20" leste, com área de cerca de 42.311 km², dividida em duas regiões, uma relativa à área central de conservação e outra à área tampão ao redor da unidade de conservação. Contudo, a região de estudo circunscreve-se a área de conservação, com cerca de 22.953 km² (Figura 1a). O clima da região é tropical sub-úmido seco, influenciado pela presença de inselbergs e da Serra de Mecula, que estimulam a precipitação pluvial orográfica, sobretudo a oeste da reserva. A temperatura média anual varia entre 20° e 26°C (Figura 1d), enquanto a precipitação pluvial média anual varia entre 770 e 1.140 mm (Figura 1c).

De acordo com Timberlake *et al.* (2004), a cobertura vegetal é caracterizada pela ocorrência de quatro formações vegetais com características fisionômicas distintas: Floresta Decídua; Bosque Ribeirinho e Matagal; Vegetação de Inselbergs, Vegetação da Serra de Mecula. Segundo White (1983) 72% do total da área da reserva é coberta pela Floresta Zambéziana de Miombo Seco, as quais ocorrem em solos arenosos, em terrenos altos, predominando a *Brachystegia spiciformis*, *Bachystegia boehmii* e espécies de plantas *Julbernardia globiflora*.

O relevo da região é caracterizado por altitudes que variam entre 136 e 1.413 m (Figura 1b), com aumento crescente de leste para oeste, com ocorrência de depressões hidromórficas suaves ou vales extensos, interrompidos pelas formações rochosas de inselbergs. A reserva faz parte da bacia hidrográfica de Rovuma, caracterizada pela ocorrência de diversos rios, destacando-se os Rios Rovuma e Lugenda.

2.2 Dados

Foi utilizada uma série temporal de dados NDVI/MODIS do satélite Terra, produto MOD13Q1 (Coleção 5), resolução espacial 250 m, composição temporal 16 dias, tile h21v10, adquiridas no website <https://mrtweb.cr.usgs.gov/>. O período de estudo compreendeu janeiro de 2001 a dezembro de 2015, totalizando 345 imagens. O NDVI, é obtido a partir da razão normalizada entre as bandas do infravermelho próximo (pNIR) e a banda do vermelho (pRED), variando entre -1 e 1, de acordo com a equação 1 (ROUSE *et al.*, 1973):

$$NDVI = \frac{(pNIR - pRED)}{(pNIR + pRED)} \quad (1)$$

Foi utilizada também uma série temporal de imagens de qualidade radiométrica do pixels (Confiabilidade do Pixel) do sensor MODIS, para a ponderação dos pesos na filtragem da série temporal. No processo de filtragem, os pixels de melhor qualidade receberam maiores pesos, enquanto que os de pior qualidade receberam menores pesos, de acordo com a recomendação de Jönsson e Eklundh (2012).

2.3 Processamento

As séries temporais foram processadas no programa computacional TIMESAT (JÖNSSON & EKLUNDH, 2004; 2012), com vista à suavização da série de índice de vegetação e extração de métricas fenológicas. As imagens de NDVI foram ponderadas com as imagens de confiabilidade dos pixels e suavizadas utilizando o filtro Savitzky-Golay (Equação 2).

$$Y_j = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} C_i Y_{j+i}}{N} \quad (2)$$

em que: Y^* é o resultado do valor do NDVI; Y é o valor do NDVI original; C_i é o coeficiente para o i da janela de suavização de NDVI; N é o número inteiro da convolução, que é igual ao tamanho da janela de suavização ($2m+1$); j representa o índice de processamento da data ordenada na tabela original dos dados; m representa metade da largura da janela de suavização (SAVITZKY & GOLAY, 1964).

Este é um método de filtragem adaptativa, baseado em média móvel, cujo valor da janela é pré-estabelecido conforme a natureza do ruído (BORGES, 2014). Segundo Borges *et al.* (2014), este método é mais flexível em relação aos outros filtros implementados no TIMESAT.

Os parâmetros elegidos para o ajuste da função no software TIMESAT para a filtragem dos dados foram: filtro Savitzky-Golay com janela 5, força de adaptação à curva de 3; método de corte de pico (spike Method) de 3; limite da amplitude (Cut-off) de 0 e número de interações de 2. Os valores de confiabilidade dos pixels foram categorizados e

atribuídos pesos de acordo os valores da Tabela 1.

2.3.2 Regiões homogêneas e perfil espectro-temporal

A fim de identificar a ocorrência de um padrão sazonal das grandes formações vegetais, com elevada homogeneidade interna e relacioná-lo com as métricas fenológicas, foram criadas as regiões homogêneas da cobertura vegetal. Estas, representam agrupamentos de pixels com variabilidade espectral e temporal semelhante. Para esta análise foi elaborada uma nova série temporal constituída de 23 imagens sequenciais ao longo do ano, em que cada pixel representa a média do período de 2001 a 2015.

As imagens da série média foram submetidas ao processo de agrupamento, utilizado o classificador K-médias, que utiliza a distância euclidiana para calcular as distâncias entre os pixels e os centróides dos pixels. Foram testados diferentes números de grupos, tendo como referência o mapa de uso e cobertura de terra disponibilizado pelo Centro Nacional de Cartografia e Teledetecção de Moçambique (CENACARTA).

Para os grupos identificados foram extraídos o perfil espectro-temporal de NDVI, consecutivamente, elaborado o gráfico da dinâmica temporal e determinadas as estatísticas descritivas (média, desvio-padrão e coeficiente de variação).

Tabela 1: Categorias de confiabilidade dos pixels e pesos atribuídos no TIMESAT

Categoria do Pixel	Descrição	Pesos atribuídos no TIMESAT
-1	Sem dado	0
0	Dado confiável, usar sem restrições.	1
1	Dado marginal, usar com restrições.	0,5
2	Neve/gelo	0
3	Nuvens	0

Fonte: LP-DAAC (2016).

2.3.3 Métricas fenológicas

Inicialmente foram identificados para cada ciclo anual o valor mínimo encontrado para o início e o valor máximo para o fim do ciclo fenológico, de acordo com a recomendação de Eklundh & Jönsson (2012).

Entretanto, somente catorze ciclos foram analisados, visto que o último ano foi desconsiderado na criação de métricas, pois este não completa um ciclo fenológico completo. No presente trabalho foi escolhido o nível de 20% para o parâmetro de início e o final do ciclo fenológico e o parâmetro de sazonalidade foi de 1, que representa um ciclo.

Foram, então, extraídas 10 métricas fenológicas para cada ciclo (Figura 2):

- (a) Início de ciclo; (b) Fim do ciclo; (c) Duração do ciclo; (d) Nível de base (Mínima atividade fotossintética ou valor mínimo de NDVI); (e) Valor máximo (Máxima atividade fotossintética ou valor máximo de NDVI); (f) Amplitude sazonal; (j) Integral maior (Produtividade total); (i) Integral menor (Produtividade sazonal); (g) Derivada da esquerda (Taxa de rebrota “green-up”); (h) Derivada da direita (Taxa de senescência “browndown”).

As métricas foram determinadas para cada ciclo anual e, posteriormente, foram gerados mapas médios de cada métrica fenológica para o período entre 2001 e 2015.

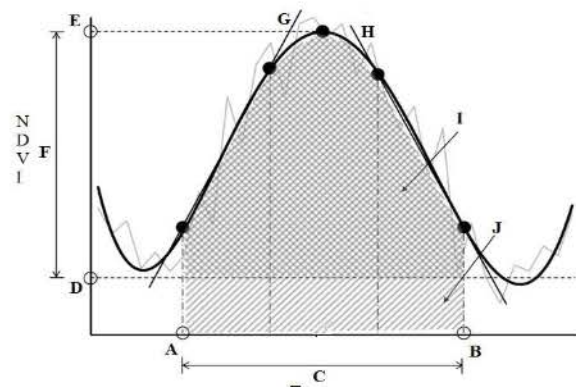


Fig. 2 - Métricas fenológicas extraídas pelo TIMESAT. Os pontos a e b marcam o Início e o Final do ciclo sazonal; c Duração do ciclo; d Mínima atividade fotossintética; e Máxima atividade fotossintética; f Amplitude; g Derivada da esquerda (Taxa de rebrota “green-up”); h Derivada da direita (Taxa de senescência “browndown”). As integrais i e j mostram o efeito cumulativo de crescimento da vegetação durante a temporada. Fonte: Adaptado de Tuanmu *et al.* (2010).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção está dividida em duas subseções. A primeira, apresenta as principais regiões homogêneas da cobertura vegetal, sua localização, seu comportamento espectro-temporal e análise estatística quanto a sua variabilidade. Na segunda subseção, é apresentada a caracterização das métricas fenológicas da cobertura vegetal e sua relação com as regiões homogêneas.

3.1 Regiões homogêneas e perfil espectro-temporal

Com base no perfil espectro-temporal do NDVI foram identificadas, na área de estudo, seis regiões homogêneas quanto à cobertura vegetal, quais sejam: Floresta Decídua, Floresta Aberta Semi-decídua, Floresta Ribeirinha e Matagal, e Floresta de Montanha. Estes resultados mostram coerência com os verificados por Timberlake *et al.* (2004), quando da caracterização biológica da cobertura vegetal da Reserva do Niassa.

A ocorrência de diferentes tipos de vegetação está fortemente ligada a componente

climatológica (temperatura do ar, precipitação pluvial, fotoperíodo), bem como o tipo de solo. As Florestas Decíduas são as predominantes, e estão distribuídas por toda reserva, mas com maior abrangência nas áreas central e a leste. Predominam nesta região a alta temperatura do ar, baixa precipitação pluvial e baixa altitude, sendo maior a incidência de incêndios florestais, sobretudo nos meses secos de maio a outubro. Também abundante, é a Floresta de Montanha, localizada na porção oeste da reserva, local com predominância das menores temperaturas do ar, maior precipitação pluvial e maior altitude. A Floresta Aberta Semi-decídua, concentra-se a leste da reserva, em áreas com predominância de temperaturas altas e baixa precipitação. Entretanto, em consequência da ocorrência de cursos de água, há influência na sazonalidade da vegetação. Já as Florestas Ribeirinhas e Matagal localizam-se próximos aos cursos de rios e são bastante influenciadas pela sazonalidade dos caudais dos rios, bem como pelo aumento da temperatura do ar.

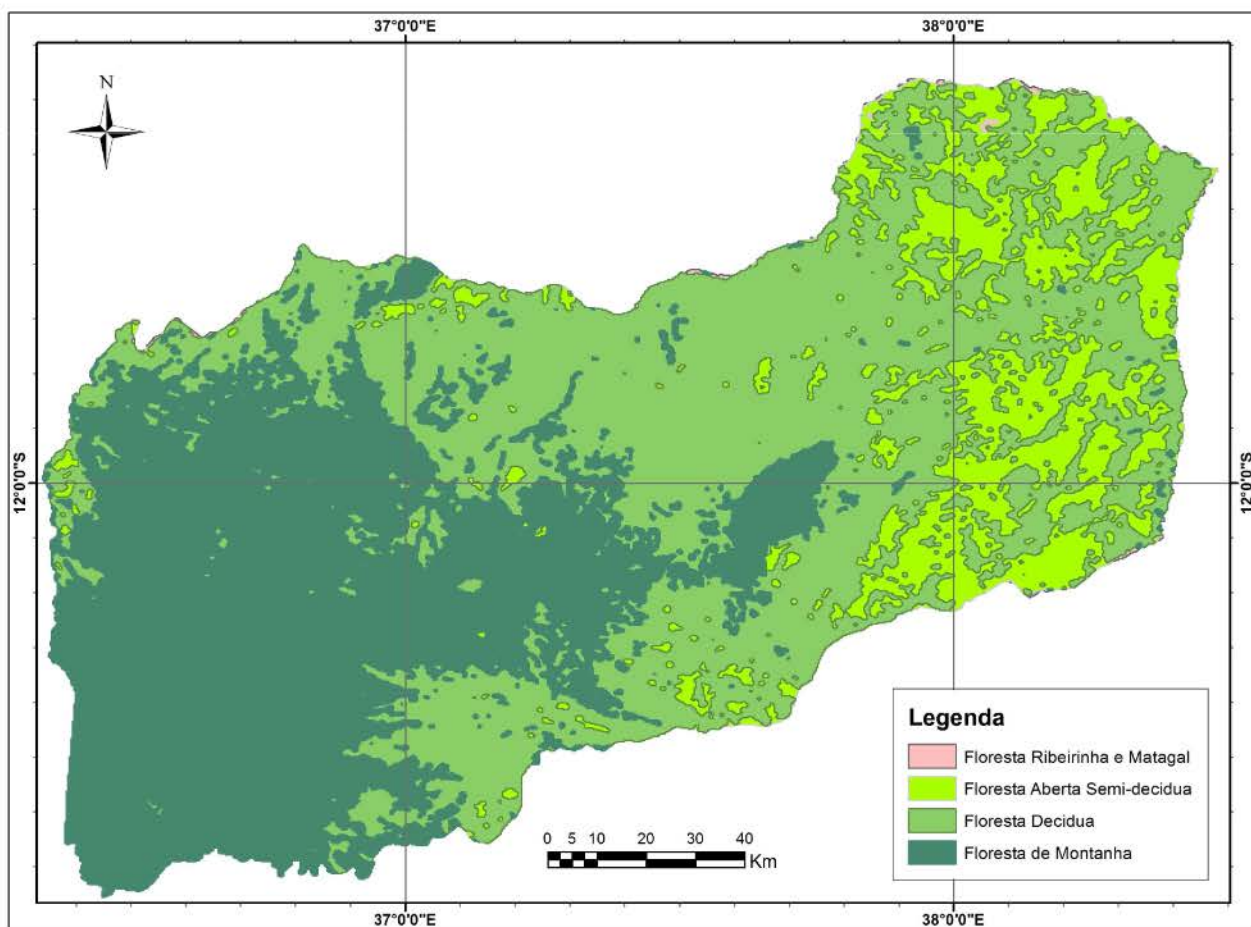


Fig. 3 - Regiões homogêneas quanto a variabilidade espectro-temporal de NDVI/MODIS, Reserva do Niassa - Moçambique.

A Figura 4 apresenta o perfil espectro-temporal das regiões homogêneas obtidas. Verifica-se que todos os tipos de vegetação apresentam baixos valores de NDVI na estação seca e valores altos na estação chuvosa, mostrando forte associação com a precipitação pluvial. Estudos realizados ao nível global em áreas sazonalmente secas apontam uma expressiva correlação entre a sazonalidade da vegetação e a precipitação pluvial (LAMPE *et al.*, 1992; MACHADO *et al.*, 1997; JUSTINIANO & FREDERICKSEN, 2000; TORRES &

GALETTTO, 2011).

Existe, entretanto, diferença entre o valor do NDVI médio entre as regiões homogêneas, sendo a Floresta de Montanha a que apresentou os maiores valores e a menor variabilidade (Tabela 2), o que é consequência do tipo e do vigor deste tipo de vegetação, assim como da localização em áreas mais chuvosas. Já as Florestas Decíduas e Aberta Semi-decíduas apresentaram maior coeficiente de variação, indicando maior variabilidade ao longo do ano, conforme esperado.

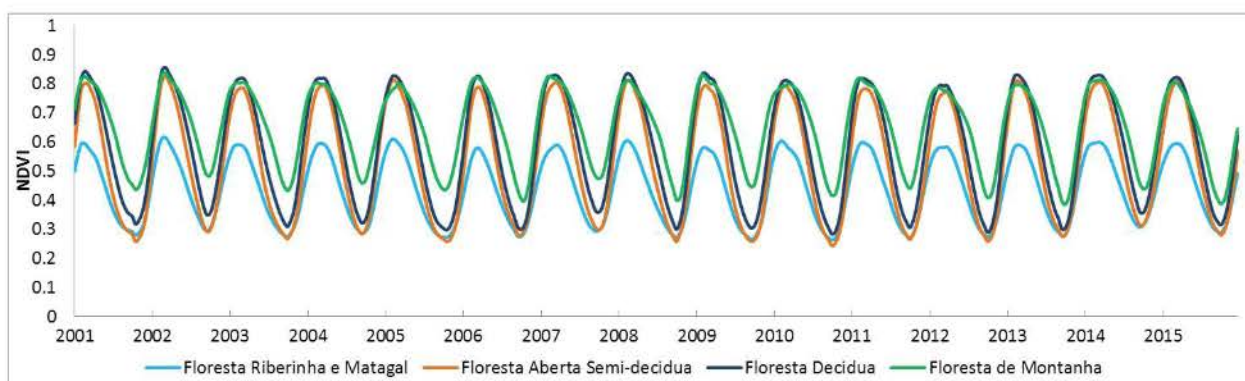


Fig. 4 - Perfil espectro-temporal do NDVI das regiões homogêneas, Reserva do Niassa - Moçambique.

Tabela 2: Estatística descritiva do perfil espectro-temporal do NDVI das regiões homogêneas, Reserva do Niassa - Moçambique

Regiões Homogêneas	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Floresta Ribeirinha e Matagal	0,43	0,11	26,05
Floresta Decídua	0,52	0,19	36,13
Floresta Aberta Semi-decídua	0,58	0,18	31,81
Floresta de Montanha	0,64	0,13	20,69

3.2 Métricas fenológicas

Os resultados do padrão médio das métricas fenológicas, para o período de 2001 a 2015, são ilustrados na Figura 5, oportunizando observar as diferenças fenológicas da vegetação da Reserva do Niassa. De forma geral, as métricas revelam forte interferência do fator climático, especialmente da forma como a precipitação pluvial e a temperatura do ar estão distribuídas na região, bem como a localização de diferentes tipos de uso e cobertura de terra.

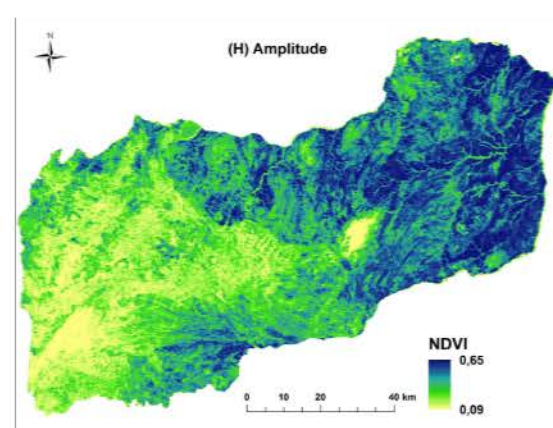
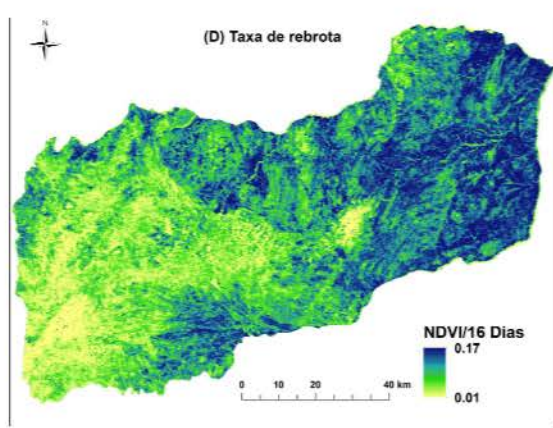
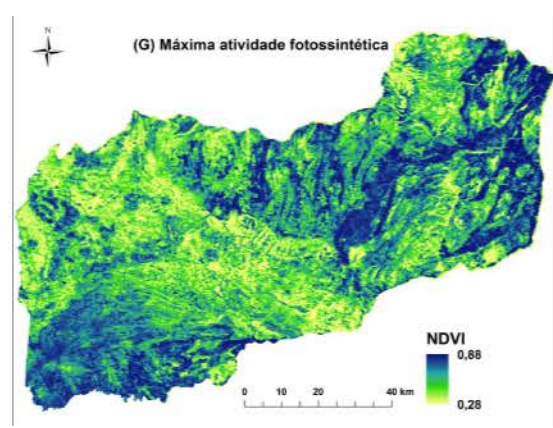
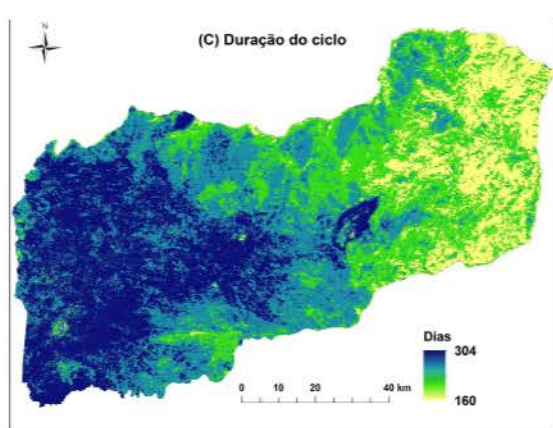
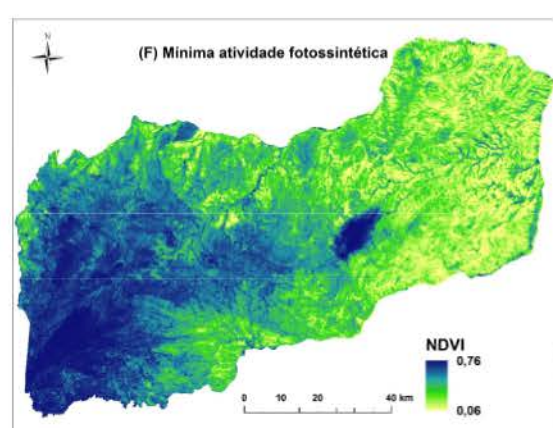
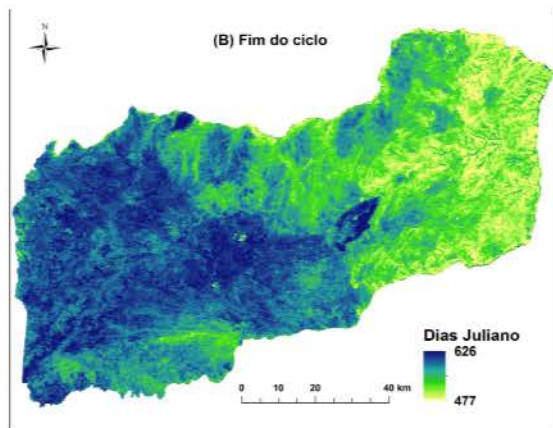
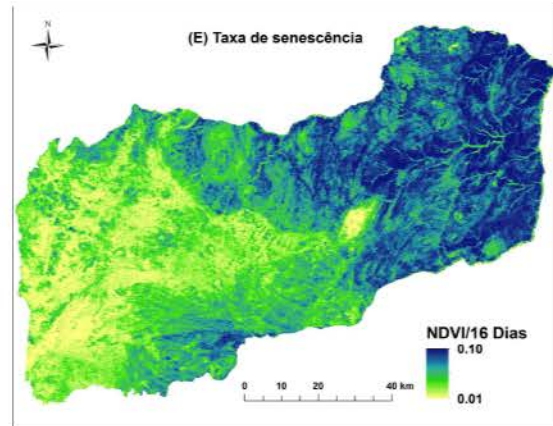
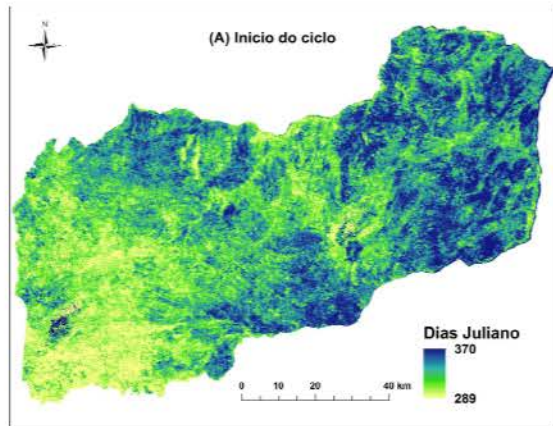
Em todas as métricas pode-se observar características que diferenciam as porções leste e o centro, com baixa precipitação pluvial e temperaturas mais elevadas e com ocorrência de Floresta Decídua e Aberta Semi-decídua,

da porção oeste da reserva, com precipitação alta, menores temperaturas e a ocorrência de Florestas de Montanha. Entretanto, as Florestas Ribeirinhas e Matagal também são influenciados pela sazonalidade da precipitação pluvial, fundamentalmente pelo caudal dos rios.

Observando a reserva de forma regional, verifica-se que o Início do ciclo (Figura 5A) ocorre em algumas áreas em meados de outubro, que coincide com o início do ano hidrológico e se estende até o início de janeiro, em outras fitofisionomias. O elemento precipitação pluvial apresenta alta associação com esta métrica. Para a média das regiões, verifica-se que as Florestas Ribeirinhas e Matagal, apresentam o início de ciclo mais precoce (Tabela 3), devido ao aumento dos caudais dos rios no início da estação. As

Florestas de Montanha também apresentam um início do ciclo precoce, devido às temperaturas mais amenas e a maior precipitação pluvial da

região. Já as Florestas Decíduas e a Floresta Aberta Semi-decíduas apresentam o início de estação mais tardio.



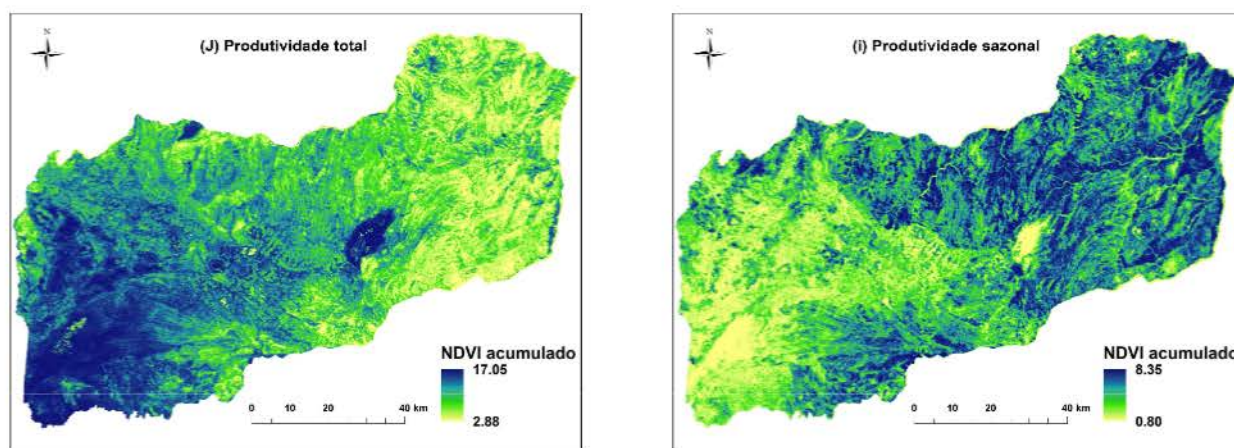


Fig. 5 - Métricas fenológicas extraídas da série temporal de NDVI/MODIS, do período de 2001-2015, Reserva do Niassa - Moçambique.

O Final do ciclo (Figura 5B) variou na região desde a primeira quinzena de abril até a segunda quinzena de setembro, como decorrência da queda da temperatura. Segundo Franco (2008) devido às baixas temperaturas, a

vegetação inicia um período de seca fisiológica, levando-a à senescência. Em média, as Florestas de Montanha apresentaram o Final do ciclo mais tardio, em relação a outras fitofisionomia, devido a sua localização em áreas de maior altitude.

Tabela 3: Média das métricas fenológicas em relação a cada região homogênea, Reserva do Niassa - Moçambique

Métricas fenológicas	Regiões homogêneas			
	Floresta Ribeirinha e Matagal	Floresta Aberta Semi-decídua	Floresta Decídua	Floresta de Montanha
Início de ciclo (Data)	17/10	13/11	7/11	30/10
Fim do ciclo (Data)	30/5	5/5	25/5	29/8
Duração do ciclo (Dias)	160	176	208	288
Taxa de rebrota (NDVI/16 dias)	0,05	0,09	0,09	0,07
Taxa de senescência (NDVI/16 dias)	0,03	0,06	0,05	0,03
Mínima atividade fotossintética (NDVI)	0,20	0,26	0,30	0,41
Máxima atividade fotossintética (NDVI)	0,47	0,75	0,77	0,74
Amplitude (NDVI)	0,29	0,51	0,50	0,38
Produtividade sazonal (NDVI acumulado)	3,34	5,91	6,24	5,18
Produtividade total (NDVI acumulado)	7,23	10,62	11,97	13,51

A Duração do ciclo (Figura 5C), que é o período entre, o início e o fim da estação, também evidenciou as diferenças entre as regiões. O ciclo fenológico das Florestas de Montanha teve uma duração média de 288 dias, em consequência da estacionalidade desta vegetação (Tabela 3). Já a menor duração do ciclo aconteceu nas Florestas Ribeirinhas, na ordem de 160 dias.

Este é o período de duração da estação chuvosa de verão, quando as folhas apresentam picos plenos da capacidade fotossintética (FERRERA, 2012; LUO *et al.*, 2017;). A duração do ciclo está estritamente ligada a rebrota e a senescência.

As Florestas Decíduas e Semi-decíduas apresentam maior taxa de rebrota, bem como de senescência, em comparação às Florestas

Riberinhas e Florestas de Montanha (Figura 5D e 5E). Este padrão está relacionado ao aproveitamento máximo das Florestas Decíduas e Semi-decíduas do início da disponibilidade hídrica para a sua recuperação após o período seco.

Segundo Becerra *et al.* (2009), algumas fitofisionomias savânicas passam por um processo de perda, total ou parcial, de folhas na estação seca e rebrota acelerada com aumento dos processos metabólicos na estação chuvosa. Entretanto, verifica-se que este processo é mais expressivo em Florestas Decíduas e Semi-decíduas. As altas taxas de senescência destas fitofisionomias são indicadores claros da sua vulnerabilidade precoce ao fogo.

Na área de estudo, a Mínima atividade fotossintética, ou menor valor de Índice de Vegetação, variou entre 0,06 e 0,76 (Figura 5F). O menor valor foi observado nas formações Florestais Decíduas e Floresta Aberta Semi-decíduas (Tabela 3). Nestas formações, pelas suas características, há uma maior perda de folhas e, portanto, observa-se a mais baixa atividade fotossintética no período de menor disponibilidade hídrica.

A Máxima atividade fotossintética (Figura 5G), ou maior valor de NDVI, variou entre 0,28 e 0,88 na região, com distribuição heterogênea em todas as formações vegetais. Este padrão está relacionado à disponibilidade hídrica e ao fotoperíodo, em que as plantas atingem o maior pico de fotossíntese ou estágio de verdor, independente do tipo de formação vegetal (PEREIRA *et al.*, 2008; DUGARSUREN & LIN, 2016).

Nesta perspectiva, não existe uma relação direta entre a Máxima atividade fotossintética e as regiões homogêneas (Tabela 3). Houve heterogeneidade dentro de cada região e diversas fitofisionomias apresentam valores médios na ordem de 0,7, com exceção de Florestas Ribeirinhas e Matagal.

A Amplitude (Figura 5H), que é a diferença entre valores mínimos e máximos de NDVI, assemelha-se aos valores de Mínima e Máxima atividade fotossintética, na qual as Florestas Abertas e as Florestas Semi-decíduas e Decíduas apresentaram maior variação, ligadas à sua maior sazonalidade. Já as Florestas de Montanha apresentam uma baixa sazonalidade,

como decorrência das baixas temperaturas e maior precipitação pluvial. Este grupo vegetal tem uma duração de estação mais longa e consequentemente menor amplitude.

A Produtividade sazonal (Figura 5I), que é a produtividade da vegetação em uma determinada estação, apresentou maiores valores nas Florestas Decíduas e Florestas Abertas Semi-decíduas. Este padrão está estritamente relacionado à sazonalidade da vegetação, que neste período apresenta maior produção vegetal.

A quantidade de biomassa que pode ser registrada em um local durante todo o período é expressa pela métrica Produtividade total (Figura 5J). Os maiores valores foram encontrados nas Florestas de Montanha (Tabela 3), o que está relacionado à estrutura da vegetação. Nestas áreas, as temperaturas são baixas e há alta incidência da precipitação pluvial, e consequente maior duração do ciclo. A estrutura da vegetação nesta região tende a ser maior, em comparação às Florestas Decíduas e Florestas Aberta Semi-decíduas, bem como as Florestas Ribeirinhas e Matagal. Contudo, esta métrica é o inverso da produtividade sazonal.

4. CONCLUSÕES

A técnica de agrupamento, baseada no padrão temporal de uma série de imagens sequenciais de NDVI, permitiu gerar regiões homogêneas, que representam os principais grupos vegetais da Reserva do Niassa.

Todas as regiões homogêneas da Reserva do Niassa são marcadas por forte sazonalidade, e este padrão está associado com a precipitação pluviométrica. Entre as regiões homogêneas avaliadas, as que apresentam maior variabilidade são as Florestas Decíduas e Florestas Aberta semi-decíduas.

Existe um padrão fenológico típico e distinto entre as regiões homogêneas, o qual está relacionado a condições climáticas da região.

Os resultados demonstram, portanto, o potencial da série temporal NDVI do sensor MODIS, para o uso na discriminação da fenologia vegetal.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de Doutorado ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, E.M.; ALVES, M.A.S. Fenologia *Psychotria nuda* ep. Brasiliense (Rubiaceae) em uma área de floresta Atlântica do sudeste do Brasil. *Acta Botânica Brasílica*, São Paulo, v. 14, p. 335-346, 2000.
- ARANTES, A. **Fenologia da vegetação e a sua relação com a água e o carbono em ambientes de Cerrado no Brasil: Influências do uso e cobertura da terra no passado**, presente e futuro. 2015, p. 23-26. Dissertação (Mestrado em Geografia)- Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2015. <<https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tede/4947/5/Disserta%3%a7%3%a3o%20-20Arielle%20Elias%20Arantes%20-2015.pdf>> Acesso em: 20 de Jun. 2015.
- BAJOCCO, S.; DRAGOZ, E.; GITAS, I.; SMIRAGLIA, D.; SALVATI, L.; RICOTTA, C. Mapping Forest Fuels through Vegetation Phenology: The Role of Coarse Resolution Satellite Time-Series. **PLoS ONE**, p. 1-14, 2015.
- BECERRA, J.; SHIMABUKURU, Y.; ALVALA, R. Relação do padrão sazonal da vegetação com a precipitação na região de Cerrado da Amazônia legal, usando índices espectral de vegetação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.2, p.126, 2009.
- BORGES, E. F.; SANO, E. E.; MEDRADO, E. "Radiometric quality and performance of TIMESAT for smoothing moderate resolution imaging spectroradiometer enhanced vegetation index time series from western Bahia State, Brazil." **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 8, p. 6, 2014.
- BORGES, E. F. **Descrição e caracterização Fenológica de classes de cobertura vegetal natural e antrópica do oeste da Bahia a partir de séries temporais do sensor MODIS**. 2014, p. 77. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, 2014.
- BOHOVIC, R.; DOBROVOLNY, P.; KLEIN, D. The Spatial and Temporal Dynamics of Remotely-sensed Vegetation Phenology in Central Asia in the 1982-2011 Period. **European Journal of Remote Sensing**, p. 279-299, 2016.
- BROICH, M.; HUETE, A.; TULBURE, M. G.; MA, XIN, Q.; PAGET, M.; RESTREPO-COUBE, N.; DAVIES, K.; DEVADAS, R.; HELD, A. **Land surface phenological response to decadal climate variability across Australia using satellite remote sensing**. *Biogeosciences*, 11, p. 5181-5198, 2014.
- CLELAND, E. E.; CHUINE, I.; MENZEL, A.; MOONEY, H. A.; SCHWARTZ, M. D. Hifting plant phenology in response to global change. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 22, n. 7, p. 357-365, 2007.
- De BEURS, K. M.; HENEGBRY, G. M. Land surface phenology, climatic variation and institutional change: analyzing agricultural land cover change in Kazakhstan. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, p. 497-509, 2004.
- DUGARSUREN, N.; LIN, C. Temporal variations in phenological events of forests, grasslands and desert steppe ecosystems in Mongolia: a remote sensing approach. **Annals of Forest Research**, p. 175-190, 2016.
- CRAIG, G.C. Aerial survey of wildlife in the Niassa Reserve and hunting concessions. Prepared for Sociedade para a Gestão e Desenvolvimento da Reserva do Niassa, **Maputo-Moçambique**, p. 38, 2009.
- EL VILALY, M.A.M. **Drought Monitoring with Remote Sensing Based Land Surface Phenology Applications and Validation**. 2013, p. 1-177, Tese (Doutorado em Ciência dos Recursos das Terras Áridas)- Universidade de Arizona, Arizona, 2013. <<http://hdl.handle.net/10150/301553>> Acesso em: 20 de Jun. 2015.
- EKLUNDH, L.; JÖNSSON, P. TIMESAT 3.0 - Software manual. Lund: **Lund University**, p.82, 2012.
- FICK, S.E.; HIJMANS, R.J. Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, 2017.
- FERRERA, T.S. **Fenologia de espécies arbóreas nativas no Jardim Botânico da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS**. 2012, p. 104. Dissertação (Mestrado em Agrobiologia) - Universidade Federal de Santa Maria, 2012.
- FRANCO, A.M.S. **Estrutura, diversidade e aspectos ecológicos do componente arbustivo**

e arbóreo em uma floresta estacional, Parque Estadual do Turvo, Sul do Brasil. 2008, p. 61, Tese (Doutorado em Ciências: Botânica) -Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2008.

GU, Y.; BROWN, J.; MIURA, T.; LEEUWREN, W. J.; REED, B. Phenological Classification of the United States: A Geographic Framework for Extending Multi-Sensor Time-Series Data. **Remote Sensing**, v. 2, n.2, p. 526-544, 2010.

HASENACK, H.; WEBER, E.; FERNANDES, S. M. C.; JONAS, R.J.; DUARTE, E.H.G. **Processamento e organização de modelos digitais de elevação contínuos para os países de língua portuguesa a partir do SRTM.** 2010. UFRGS-Centro de Ecologia. ISBN 978-85-63843-04-3. Disponível em <<http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo>>. Acesso em: 10 Out. 2016

Haggerty, B. P.; Mazer S. J.; The Phenology Handbook - A guide to phenological monitoring for students, teachers, families, and nature enthusiasts. **University of California**, p. 2-20, 2008.

Huan, T.; Zhenwang, L.; Zhiliang, Z.; Baorui, C.; Baohui, Z.; Xiaoping, X. Variability and Climate Change Trend in Vegetation Phenology of Recent Decades in the Greater Khingan Mountain Area, Northeastern China. **Remote sensing**, p. 2072-4292, 2015.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT: A program for analyzing time-series of satellite sensor data. **Computers & Geosciences**, v. 30, n. 1, p. 833-845, 2004.

JUSTINIANO, J. M.; FREDERICKSEN, T. S. Phenology of tree species in Bolivian dry forests. **Biotropica**, v. 32, p. 276- 281, 2000.

LAMPE, M. G.; BERGERON, Y.; MCNELL, R. & LEDUC, A. Seasonal flowering and fruiting patterns in tropical semiarid vegetation of northeastern Venezuela. **Biotropica**, v. 24, n.1, p. 64-76, 1992.

LP-DAAC Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m. Disponível em; <https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod13q1>. Acesso em: 18 Out. 2016.

LIETH, H. Introduction to phenology and the modeling of seasonality. In LIETH, H. (ed.) Phenology and seasonality modeling. Berlin:

Springer Verlag, p.3-19, 1974.

LUO, Z.; GUAN, H.; ZHANG, X.; LIU, N. Photosynthetic capacity of senescent leaves for a subtropical broadleaf deciduous tree species

Liquidambar formosana Hance. **Scientific Reports**, p. 1-9, 2017.

MACHADO, I. C. S.; BARROS, L. M.; SAMPAIO, E. V. S. B. Phenology of caatinga at Serra Talhada, PE, Northeastern Brasil. **Biotropica**, v. 29, n. 1, p. 57-68, 1997.

MANTOVANI, M.; RUSCHEL, A.; REIS, M.; PUCHALSKI, A.; NODARI, R. Fenologia reprodutiva de espécies arbóreas de formações secundárias da Mata Atlântica. **Revista Árvore**, v.27, n.4, p.452, 2003.

MELAAS, E. K.; FRIEDL, M. A.; ZHU, Z. Detecting interannual variation in deciduous broadleaf forest phenology using Landsat TM/ETM+ data. **Remote Sensing of Environment**, v. 132, p. 176-185, 2013.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA).

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), 2014. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov>> Acesso em: 18 Out. 2016.

NEVES, E. L.; FUNCH, L. S.; VIANA, B. F. Comportamento fenológico de três espécies de *Jatropha* (Euphorbiaceae) da Caatinga, semi-árido do Brasil. **Revista Brasileira de Botânica, São Paulo**, v. 33, n. 1, p. 155-166, 2010.

PEREIRA, T.S.; COSTA, M.L.M.N.; MORAES, L.F.D.; LUCHIARI, C. Fenologia de espécies arbóreas em Floresta Atlântica da Reserva Biológica de Poço das Antas, Rio de Janeiro, Brasil. **Série Botânica**, v. 63, n. 2, p. 329-339, 2008.

RIBEIRO, N. S.; SHUGART, H.H.; WASHINGTON-ALLEN, R. The effects of fire and elephants on species composition and structure of the Niassa Reserve, northern Mozambique. **Forest Ecology and Management**, v. 225, p. 1627, 2008.

ROADS, J.; FUJIOKA, F.; CHEN, S., & BURGAN, R. Seasonal fire danger forecasts for the USA. **International Journal of Wildland Fire**, v. 14, p. 1-18, 2005.

- ROUSE J.W.; HAAS Jr, R.H.; SCHELL J.A and DEERING, D.W. **Monitoring vegetation Systems in the Great plains with ERTS**. Third ERTS-1 Symposium, NASA SP-351 I, p.309-317, 1973.
- Savitzky, A.; Golay, M. J. E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, **Analytical chemistry**, v. 36, n. 8, p. 1627-1636, 1964.
- SOUZA, D,N,N.; CAMACHO, R,G V.; MELO.; J, I, M.; ROCHA, L, N, G.; Da SILVA, N, F. Estudo fenológico de espécies arbóreas nativas em uma unidade de conservação de Catinga no Estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Biotemas**, v. 27, n. 2, p. 31-42, 2014.
- SOUDANI, K.; HMIMINA, G.; DELPIERRE, N.; PONTAILLER, J. Y.; AUBINET, M.; BONAL, D.; CAQUET, B.; GRANDCOURT, A.; BURBAN, B.; FLECHARD, C.; GUYON, D.; GRANIER, A.; GROSS, P.; HEINESH, B.; LONGDOZ, B.; LOUSTAU, D.; MOUREAUX, C.; OURCIVAL, J. M.; RAMBAL, S.; SAINT ANDRÉ, L.; DUFRÈNE, E. Ground-based Network of NDVI measurements for tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biomes. **Remote Sensing of Environment**, v. 123, p. 234-245, 2012.
- STREHER, A. S.; SOBREIRO.; J .F F.; MORELLATO, L. P. C.; SILVA.; T. S F. Land Surface Phenology in the Tropics: **The Role of Climate and Topography in a Snow-Free Mountain. Ecosystems**. p. 1-18, 2017.
- TELES, T. **Relações de métricas fenológicas EVI/MODIS do TIMESAT com sombreamento e Padrões atípicos de temperatura em Floresta Estacional Decídua**. 2015. p. 13 Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, 2015.
- TORRES, C.; GALETTO, L. Flowering phenology of co-occurring Asteraceae: a matter of climate, ecological interactions, plant attributes or of evolutionary relationships among species? **Organisms Diversity & Evolution**, v. 11, p. 9-19, 2011.
- TIMBERLAKE, J.; GOLDING, J.; CLARKE, P. Niassa Botanical Expedition June 2003. Prepared for Sociedade para a Gestão e Desenvolvimento da Reserva do Niassa Moçambique, **Biodiversity**, N. 12, 2004.
- TUANMU, M; VIÑA, A; BEARER, S; XU, W; OUYANG, Z; ZHANG, H; LIU, J. Mapping understory vegetation using phenological characteristics derived from remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 1836, 2010.
- YOU, X; MENG, J; ZHANG, M; DONG, T. Remote Sensing Based Detection of Crop Phenology for Agricultural Zones in China Using a New Threshold Method. **Remote Sensing**, p. 3190-3211, 2013.
- WHITE, F., The Vegetation of Africa, a descriptive memoir to accompany the UNESCO/AETFAT/UNSO. **Natural Resources Research**. v. 20. p. 1-356, 1983.
- WHITE, M.A, NEMANI, R.R. Real-time monitoring and short-term forecasting of Land surface phenology **Remote Sensing of Environmet**, v. 104, p. 43-49, 2006
- ZHANG,X.Y.; FRIEDL,M.A.; SCHAAF,C.B. Global vegetation phenology from moderate resolution imaging Spectroradiometer (MODIS):evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements . **Journal of Geophysical Research**, v.111, p. 1-14, 2006.