

## **Relação das sazonalidades da precipitação e da vegetação no bioma Caatinga: abordagem multitemporal**

Jorge Alberto Bustamante Becerra  
Suzana de Carvalho  
Jean Pierre Henry Balbaud Ometto

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE  
Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil  
jorge.bustamante@inpe.br  
suzana.carvalho@inpe.br  
jean.ometto@inpe.br

**Abstract.** Precipitation is one of the most important climatic variables in the Caatinga biome that influences the spatial and temporal distribution pattern of its vegetation types. These types in turn influence the regional climate from the feedback mechanism of energy flows, water and momentum. This climate-vegetation interaction in the Caatinga is differentiated depending on the type of climate pattern in the region. This study aims to find out how the annual precipitation pattern influence the vegetation seasonality by the identification of the main phenological features of the vegetation annual growth cycles and the annual rainfall features in a gradient of five climatic regions in the Caatinga biome. We use time series (2001-2008) of vegetation indices such as NDVI and LSWI, and precipitation that was derived of TRMM satellite data and surface station data. The results indicate that precipitation variability in the rainy season influences directly the variability of vegetation growing cycles. That influence is not linear, but adjusted to a logarithmic function being precipitation better fit with LSWI ( $r^2 = 0.67$ ) than NDVI ( $r^2 = 0.54$ ). The influence of precipitation on Caatinga vegetation, using phenological metrics such as start, end, peak and length of the vegetation growing cycles, showed greater lag in climatic regions with higher precipitation while in regions with lower precipitation this lag was slight.

**Keywords:** Plant annual growth cycle, Caatinga vegetation, climatic seasonality and time series.

### **1. Introdução**

A perda de habitats naturais é um dos principais problemas que o bioma Caatinga sofre, ao igual que os outros biomas brasileiros. Segundo o mapeamento do desmatamento da Caatinga efetuado pelo MMA-IBAMA (2011), este bioma sofreu uma perda de 45,62% de vegetação natural até o ano de 2009 que foi convertida principalmente em agropecuária e outros usos da terra e que a taxa de desmatamento anual daquele ano (2008-2009) foi de 0,23%, indicando assim um ritmo crescente de desmatamento da vegetação natural da Caatinga. Estas alterações na cobertura natural têm impacto na interação da biosfera terrestre com a atmosfera e conseqüentemente com o clima da região. Isto devido a alteração do ciclo de carbono e água pela diminuição da cobertura vegetal que acarreta menor fixação de água e carbono atmosférico nas plantas. Mudanças na cobertura vegetal, principalmente perda do estrato arbóreo, influenciam também na fenologia da vegetação da região com ciclos de crescimento anual com menor produtividade vegetal na região. Ainda estas alterações na cobertura vegetal podem influenciar o regime de chuvas que pela sua vez pode se traduzir em alterações dos diferentes eventos fenológicos da vegetação como alterações no início, fim, amplitude e comprimento da estação de crescimento da vegetação.

A sazonalidade climática, especialmente da precipitação, influencia a sazonalidade da vegetação. Isto significa que, o ciclo de crescimento anual da vegetação (identificado segundo parâmetros de fenologia da vegetação) tem relação direta com a sazonalidade climática anual, especialmente da precipitação, como pode ser observado em regiões adjacentes à Caatinga (BUSTAMANTE et al., 2012). Da mesma forma a variabilidade climática interanual deve propiciar

variabilidade interanual nos ciclos de crescimento da vegetação, mostrando num determinado período de anos, ciclos de crescimento com maior ou menor produtividade primária ou que significa ciclos com maior ou menor absorção e fixação de carbono atmosférico o qual influencia no clima regional.

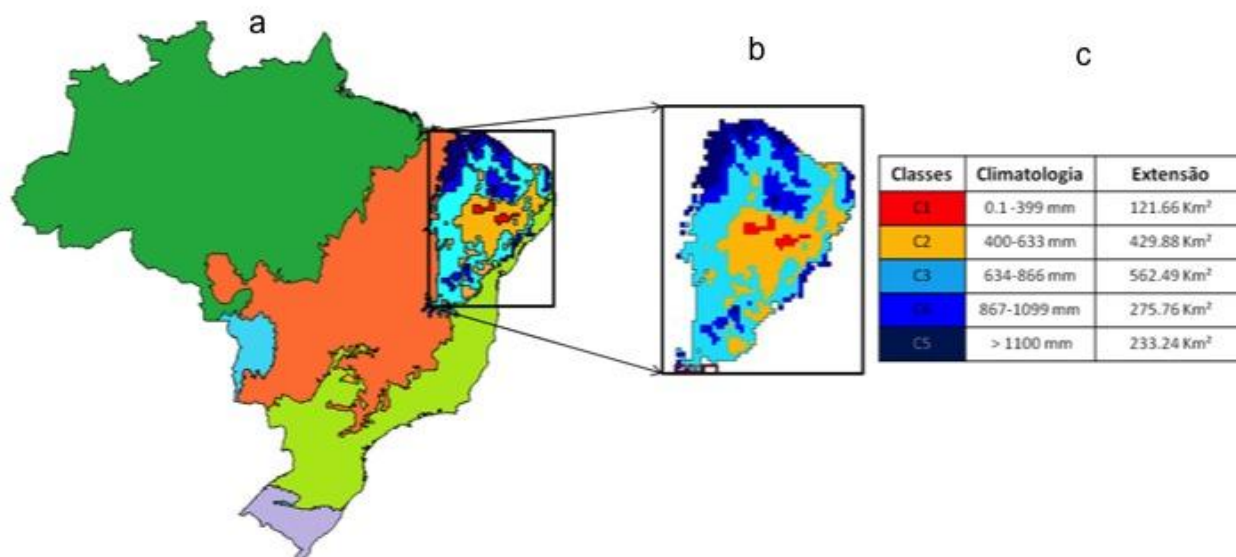
Na região da Caatinga, o estudo da variabilidade sazonal da vegetação e a sua relação com a precipitação em escala regional é possível a traves dados multitemporais de sensores remotos e satélites como o MODIS, disponibilizando séries temporais de índices de vegetação (NDVI-índice de vegetação de diferença normalizado e EVI-índice de vegetação melhorado) e vários canais do espectro de radiação eletromagnética LSWI (índice de umidade da vegetação), e o TRMM, com series temporais de precipitação. Os índices de vegetação, em geral, conseguem captar períodos de maior a menor atividade fotossintética, relacionados com maior a menor produção de folhas (produtividade primária) ao longo do tempo (série temporal), desta maneira pode-se caracterizar a fenologia da vegetação a traves de métricas como início, fim, comprimento e amplitude do ciclo de crescimento da vegetação em escala regional (Eklundh, 2011). Da mesma forma, os dados de precipitação do TRMM conseguem monitorar as características sazonais da precipitação num ciclo anual ou ciclos inter-anuais. A compreensão da dinâmica de fenologia da vegetação é de suma importância, pois estimativas precisas da fenologia são essenciais para a quantificação do intercâmbio de carbono e água entre os ecossistemas e a atmosfera e sua resposta às alterações climáticas (Ahl et al., 2006).

O objetivo central deste trabalho é responder a questão: como o padrão de precipitação anual influencia a sazonalidade da vegetação? Para tal, este trabalho identificou as principais características fenológicas dos ciclos de crescimento da vegetação e características de sazonalidade da precipitação em cinco regiões climatológicas no bioma caatinga usando séries temporais de dois índices de vegetação, NDVI e LSWI, e de precipitação, dados do satélite TRMM e dados de estações de superfície. Desta maneira pretendemos relacionar padrões de sazonalidade da precipitação como padrões de fenologia da vegetação, assim como identificar o tempo de resposta da vegetação, defasagem (lag), à precipitação no gradiente de classes climatológicas no período 2001 a 2008 na região da Caatinga.

## 2. Material e Métodos

A área de estudo é o bioma Caatinga (Figura 1), que segundo o IBGE (2004) ocupa uma área de 844.453 km<sup>2</sup>, abrangendo 9,92% do território nacional e está situado entre as coordenadas 3<sup>o</sup> e 17<sup>o</sup>S e 35<sup>o</sup> e 45<sup>o</sup>W. Apresenta um tipo de vegetação predominantemente arbustiva-arbórea, que apresenta acentuada queda foliar durante a estação seca e, em geral, vêm sofrendo muita perturbação antrópica, sendo frequentemente utilizadas para o estabelecimento de atividades de agricultura ou utilizadas como áreas de pastagens nativas (Araújo et al., 2007). O clima do Nordeste brasileiro é caracterizado como semi-árido, geralmente apresenta como característica marcante apenas duas estações: a chuvosa que dura entre três e cinco meses e a seca que dura de sete a nove meses (Mendes, 1992; Araujo, 2007).

Na Caatinga encontram-se dois tipos fisionômicos de vegetação, não florestal e florestal. O tipo não florestal, que domina a região, é representada pela vegetação caducifólia espinhosa, chamada de caatinga (Savana Estépica sensu, segundo VELOSO et al., 1991) e o tipo florestal, que ocorre em menor proporção, correspondem as florestas perenifólias, semidecíduas e decíduas (TAVARES et al., 2000; FERRAZ et al., 2003).



**Figura 1.** Localização da área de estudo, bioma Caatinga, no Brasil (a), classificação climatológica de precipitação (período de 1999 a 2008) da Caatinga (b) e intervalos de precipitação usados na definição das cinco classes acompanhados das suas respectivas extensões (c).

Os materiais utilizados correspondem a séries temporais (2000 a 2008) de índices de vegetação MODIS e de dados de precipitação do satélite TRMM combinados com dados de estações de superfície, além de informações complementares. Estes dados compõem o conjunto de quatro tiles (h13v09\_v10 e h14v09\_v10) com resolução espacial de 1km e temporal de 16 dias, com 23 períodos por ano, totalizando 184 períodos.

A metodologia para identificar a sazonalidade da precipitação e da vegetação do bioma caatinga consistiu em identificar cinco regiões com regimes que vão de menor (C1) a maior precipitação (C5), conforme Figura 1c. Para cada classe (C1 a C5) foram extraídos os valores de NDVI e elaborados o índice LSWI. O LSWI foi calculado usando as bandas do infravermelho próximo e médio obtidas do mesmo produto. Um algoritmo foi elaborado para geração do LSWI aplicando a seguinte equação  $LSWI = (\rho_{nir} - \rho_{mir}) / (\rho_{nir} + \rho_{mir})$ , onde  $\rho$  representa o fator de reflectância nas bandas do infravermelho próximo (nir) e infravermelho médio (mir). Foram também extraídos dados de precipitação *merge*, daqui para frente denominado de PREC, para cada classe climatológica. Medianas dos índices de vegetação, NDVI e LSWI, e de PREC, para cada uma das datas analisadas ( $N_{imagens} = 23_{\text{datas por ano}} \times 9_{\text{anos}}$ ) da série temporal (2001 a 2008) são obtidas para posterior correlação entre essas três variáveis.

A metodologia para identificar as métricas de fenologia da vegetação e sazonalidade da precipitação está centrada na análises de series temporais das três variáveis, NDVI, LSWI e PREC, para cada uma das regiões contidas nas cinco classes climatológicas e segue o procedimento descrito por Eklundh; Jonsson (2011). As métricas analisadas são: início, fim, comprimento, pico (máximo valor no ciclo), e integrais dos ciclos de crescimento da vegetação e sazonalidade da precipitação. Estas integrais são definidas como: *integrL (large integral)* que integra a área entre o valor zero e o pico máximo da variável e *integrS (small integral)* que integra o valor da base ao pico da variável (EKLUNDH; JÖNSSON, 2011). As análises destas métricas são sumarizadas em boxplots, correlações e regressões para determinar a relação entre precipitação e vegetação, assim com uma análise de defasagem (lag) do efeito de reação da vegetação em relação à precipitação.

### 3. Resultados e Discussões

A variabilidade interanual, tanto na precipitação como nos índices de vegetação, em todas as métricas avaliadas são apresentadas nos *boxplots* da Figura 2. Estes gráficos mostram que em 7 ciclos de sazonalidade (precipitação-Prec) e de crescimento da vegetação (IV), identificados no

período 2001-2008 no bioma Caatinga, houve variabilidade interanual e que esta varia de acordo com a métrica de sazonalidade utilizada (início, fim, amplitude e pico do ciclo anual) apresentando em alguns casos valores extremos, definidos nos gráficos como *outliers*. Na Figura 2 também são apresentados os *boxplots* com a defasagem entre precipitação e vegetação para as mesmas métricas analisadas em (Prec) e (IV). No geral, na precipitação ao longo das cinco classes climatológicas, o início da estação chuvosa tem um gradiente que segue uma parábola positiva (concavidade para acima), o fim e amplitude da estação se assemelham levemente a uma parábola negativa, já o pico mostra gradiente ascendente de C1 a C5. Nos índices de vegetação, as métricas do ciclo de crescimento mostram que o início do ciclo aparentemente não tem um padrão definido, as outras métricas (fim, amplitude e pico) mostram tendência de gradiente ascendente. Na defasagem (*lag*) da precipitação com vegetação, ao igual que nas métricas de vegetação, o início do ciclo aparentemente não tem padrão definido, as outras métricas (fim, amplitude e pico) mostram tendência de gradiente ascendente. Estes resultados indicam que em geral, exceto a métrica que mede o início dos ciclos anuais, a defasagem (precipitação-vegetação) vai incrementando conforme o gradiente das regiões climatológicas, ou seja, nas regiões de menor precipitação, domínio de cobertura gramíneo-herbácea e arbustiva, a defasagem é menor do que nas classes com maior precipitação, domínio de vegetação arbórea decídua, semidecídua e perenifólia.

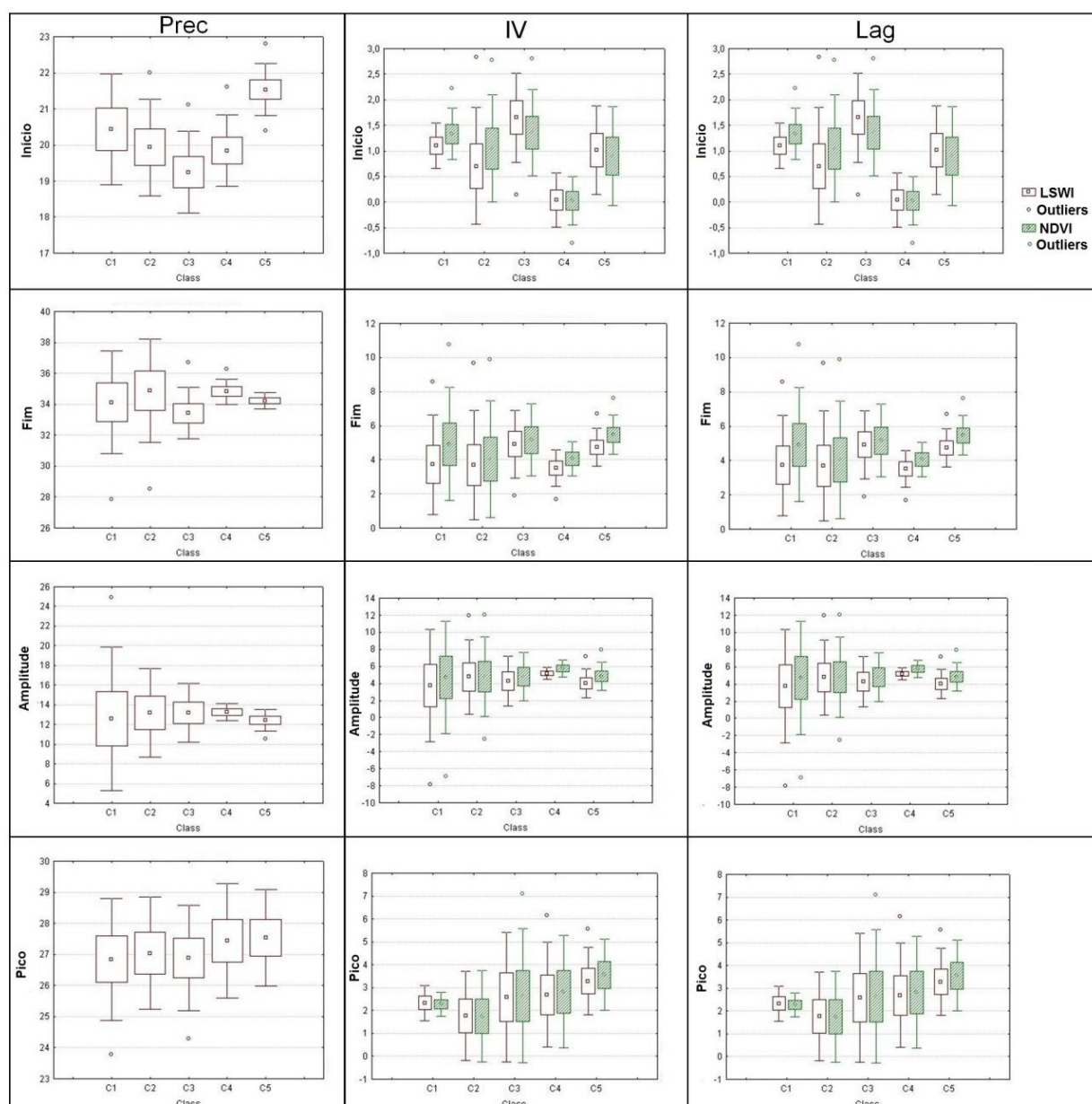


Figura 2. *Boxplots* das métricas dos ciclos de sazonalidade da precipitação (Prec) e de crescimento da vegetação, NDVI e LSWI, (IV) e *boxplots* da defasagem (Lag) entre precipitação e vegetação por classe climatológica (Class: C1, C2, C3, C4, C5). Os valores do eixo y correspondem aos períodos do ano, cada período representa 16 dias, totalizando 23 períodos por ano. Os dados correspondem a 7 ciclos sazonais da precipitação e da vegetação identificados na série temporal 2001-2008.

A Figura 3 mostra os resultados das métricas integral grande (*integrL*), que integra a área entre o valor zero e o pico máximo da variável, e a integral pequena (*integrS*) que integra o valor da base ao pico da variável para as três variáveis: NDVI (a), LSWI (b) e o ciclo sazonal da precipitação (c). Estes resultados indicam que tanto os ciclos sazonais quando os de crescimento aumentam em tamanho (área) em função ao gradiente das classes climatológicas de C1 (menor precipitação) a C5 (maior precipitação), mostrando um gradiente de menor (C1) a maior (C5) produção de fitomassa foliar num ciclo de crescimento da vegetação compatível com as regiões de menor (C1) a maior (C5) precipitação.

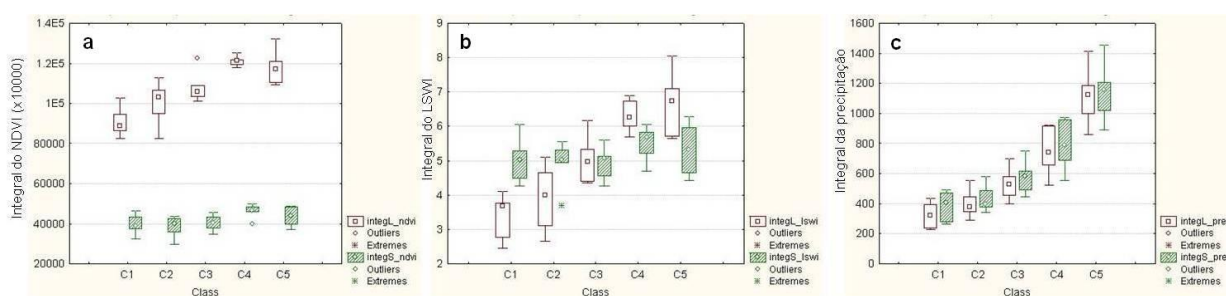


Figura 3. *Boxplots* das métricas integral da área grande (*integrL*) e da área pequena (*integrS*) para as variáveis precipitação (a), LSWI (b) e NDVI (c) identificadas nos 7 ciclos anuais da série temporal 2001 - 2008.

A Figura 4 mostra os resultados das análises de regressão entre as integrais das áreas de precipitação, que equivale ao volume de chuva no período chuvoso, com as integrais dos ciclos de crescimento identificadas com os índices de vegetação NDVI e LSWI, que equivale a produtividade primária de cada ciclo. Estes resultados indicam que a relação entre precipitação e vegetação não é linear. Esta relação obedece a uma função logarítmica que indica que em regiões com sazonalidade fortemente pronunciada (regiões mais áridas), incrementos de precipitação acompanham a rápidos incrementos de vegetação (incrementos nos valores dos índices) já em regiões com maior estação chuvosa, os mesmos incrementos de precipitação são acompanhados por incrementos menores de vegetação, quando comparado com as regiões mais secas.

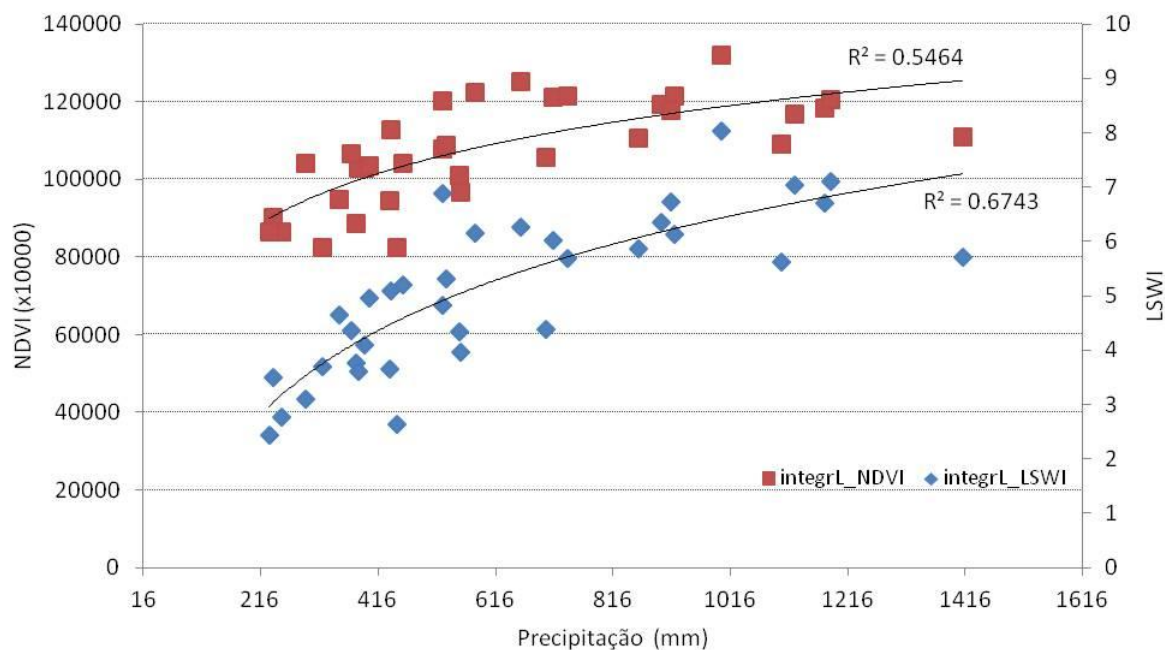


Figura 4. Influência do período chuvoso no ciclo de crescimento da vegetação (derivados com NDVI e LSWI). A métrica integrL representa a integração das áreas contidas no período de cada ciclo, para as variáveis Precipitação, NDVI e LSWI, na região da Caatinga.

Quanto à relação entre as variáveis de vegetação, os dois índices mostram alta correlação entre si. Na relação da precipitação com os índices, o LSWI ( $r^2 = 0,67$ ) mostrou maior ajuste do que o NDVI ( $r^2 = 0,55$ ), isto devido ao fato que o LSWI tem como característica monitorar o conteúdo de umidade na vegetação que no caso da Caatinga, grande parte da vegetação, está sujeita a forte estresse hídrico. Já o NDVI tende a saturar quando alcança valores altos deste índice.

#### 4. Conclusões

Os resultados apresentados, especialmente para estação seca na região, validam outros estudos sobre o LSWI, mostrando que este índice é um bom indicador da variabilidade do conteúdo de umidade da vegetação, já que nas classes de maior precipitação, a vegetação apresentou um comportamento mais resistente na estação seca enquanto que as de menor precipitação apresentaram maior sensibilidade ao estresse de umidade. Embora o NDVI seja um ótimo indicador da quantidade de fitomassa foliar, foi o LSWI que permitiu associar os maiores picos de NDVI com os altos teores de umidade. A utilização de classes climatológicas mostrou-se eficaz para caracterizar o comportamento da vegetação, conseguindo separar os intervalos de NDVI para regiões com alta e baixa cobertura vegetal. Neste sentido, os resultados corroboram a hipótese de que a sazonalidade da vegetação na Caatinga é fortemente associada ao regime de precipitação local. Sugere-se complementar os resultados encontrados com o trabalho “Caracterização da variabilidade sazonal da precipitação e da vegetação no bioma caatinga usando series temporais” com o objetivo de determinar o período exato do início da estação de crescimento para as diferentes classes da vegetação e associa-las ao teor de umidade encontrado na região.

O uso de métricas de sazonalidade da precipitação e da vegetação permitiu caracterizar e identificar os ciclos sazonais e a variabilidade interanual da precipitação e da vegetação. O uso de técnicas de filtragem Savitzki-Golay permitiu melhorar os padrões para identificação dos ciclos sazonais nas séries temporais avaliadas. A influência da precipitação na vegetação, usando métricas de sazonalidade como início, fim, pico e amplitude do ciclo mostraram maior defasagem (*lag*) nas regiões climatológicas com maior precipitação. A análise da métrica integral grande (*integrL*) que mede o período chuvoso inteiro, no caso da precipitação, e o ciclo de crescimento inteiro, na vegetação, permitiu identificar um gradiente de volume de precipitação e de produção de fitomassa

ao longo das classes climatológicas. A relação entre ambas integrais (de precipitação e vegetação) indica que existe uma relação direta entre o volume de precipitação, no período chuvoso, com o volume de fitomassa, gerado no ciclo de crescimento da vegetação. Esta relação direta não é linear, pois ela se ajusta a uma função logarítmica, sendo melhor este ajuste com o índice LSWI ( $r^2 = 0,67$ ) do que com NDVI ( $r^2 = 0,55$ ), mostrando a habilidade do LSWI em monitorar o conteúdo de umidade na vegetação que no caso da Caatinga passa por período prolongado de intenso estresse hídrico. Próximos passos devem incluir análises de séries temporais maiores e incremento de classes de uso e cobertura da terra na região.

## 5. Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST/INPE) no âmbito do projeto FAPESP-FACEPE “Impactos de Mudanças Climáticas sobre a Cobertura e Uso da Terra em Pernambuco: Geração e Disponibilização de Informações para o Subsídio a Políticas Públicas”.

## 6. Referências

- Andrade-Lima, D. The caatingas dominium. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 4, p. 149-153, 1981.
- Bustamante Becerra, J.A.; Alvalá, R.C.S.; Von Randow, C. Seasonal Variability of Vegetation and Its Relationship to Rainfall and Fire in the Brazilian Tropical Savanna. In: Boris Escalante-Ramirez. (Org.). **Remote Sensing - Applications**. Intech, v. 1, p. 77-98, 2012.
- Eklundh, L.; Jönsson, P. **Timesat 3.1 Software Manual**, Lund University, Sweden. 2011.
- Ferraz, E.M.N; Rodal, M.J.N; Sampaio, E.V.S.B. Physiognomy and structure of vegetation along an altitudinal gradient in the semi-arid region of northeastern Brazil. **Phytocoenologia**, v. 33, p. 71-92, 2003.
- Jönsson, P.; Eklundh, L., 2002, Seasonality extraction and noise removal by function fitting to time-series of satellite sensor data, **IEEE Transactions of Geoscience and RemoteSensing**, 40, No 8, 1824 – 1832.
- Jönsson, P.; Eklundh, L., 2004, Timesat - a program for analyzing time-series of satellite sensor data, **Computers and Geosciences**, 30, 833 – 845.
- Nimer, E. **Climatologia do Brasil**. 2a. ed. Rio de Janeiro: IBGE- SUPREN, (Fundação IBGE- SUPREN). Recursos Naturais e Meio Ambiente. 1989.
- Prentice, K. C. Bioclimatic distribution of vegetation for general circulation model **Journal of Geophysical Research**, vol. 95, n. 11, p. 811 – 830, 1990.
- Press, W.H.; Teukolsky, S.A.; Vetterling, W.T.; Flannery, B.P. **Numerical Recipes in Fortran**. Cambridge University Press. 1994.
- Silva, E.A.D; Carvalho,S.M.I; Becerra, J.A.B.,2011. Variabilidade sazonal do clima e da vegetação no bioma caatinga. I climatologia da precipitação. **In: VI Geonordeste 2011, Feira de Santana- BA**.
- Tavares, M.C.; Rodal, M.J.N.; Melo, A.L.; Araújo, M.F.L. Fitossociologia do componente arbóreo de um trecho de Floresta Ombrófi la Montana do Parque Ecológico João Vasconcelos-Sobrinho, Caruaru, Pernambuco. **Naturalia**, v.26, p. 243-270. 2000.
- Uvo, C.R.B. A. **Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro**. 1989. 82 f. Dissertação de Mestrado em Meteorologia - INPE, São Paulo, 1989.
- Veloso, H.P.; Rangel-Filho, A.L.R.; Lima, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. IBGE, Rio de Janeiro. 1991.
- Wilson, E. H.; Sader, S. A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, p. 385-396, 2002.