

Study of the variability of vegetation indices using clustering analysis

Ana Claudia V. e L. Gusmão*, Diogo F. B. Rodrigues*, Diego C. dos S. Araújo*, Jussara F. de S. Viana*, Suzana M. G. L. Montenegro**

*Pós-doutorando (a) em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, e-mail: villareluna@yahoo.com.br, diogo.borbar@gmail.com, diego@agro.eng.br, jussarafsouza@yahoo.com.br

**Professora Titular do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, e-mail: suzanam.ufpe@gmail.com.

Received 2 July 2021, 18 November 2021

Abstract

In the last decades, the use of remote sensing techniques has been contributing in a significantly way to the identification of changes that occur on the terrestrial surface. Considering the use of MODIS sensor products for watershed management, the present study aims to determine the vegetation indexes LAI (Leaf Area Index) and EVI2 (Improved Vegetation Index) in the Tapacurá river basin, located in the State of Pernambuco, Brazil, and, based on this, to realize, in an automatic way, the mapping of land use, with approach in the series mining by the cluster method. This allows also to evaluate the dynamics of the different vegetation groups in relation to the pluviometric regime of the basin. The vegetation indices used in this study were obtained from the reflectance product MOD09Q1 between two years with different rainfall regimes: 2011 (wet year) and 2012 (dry year). Mining of the time series of the EVI2 and LAI indices was realized by cluster analysis. Comparing the series for the two years, there was a significant decrease in vegetation indices for the year 2012, whose rainfall was below the previous year. Thus, it was concluded that LAI and EVI2 series mining was effective by the clustering method for the study of variability, which for the studied area, has been generated representative groups of polyculture areas and pasture vegetation, sugarcane, areas of transition of forest, forest, water and urban region.

Keywords: Remote sensing, IAF, EVI2.

Estudo da variabilidade de índices de vegetação utilizando análise de agrupamentos

Resumo

Nas últimas décadas, a utilização das técnicas de sensoriamento vem contribuindo de forma significativa para a identificação de alterações que ocorrem na superfície terrestre. Levando-se em consideração a utilização dos produtos do sensor MODIS para o gerenciamento de bacias hidrográficas, o presente estudo tem como objetivo determinar os índices de vegetação Índice de Área Foliar (IAF) e Índice de Vegetação Melhorado (EVI2) na bacia hidrográfica do rio Tapacurá, localizada no Estado de Pernambuco e, diante disso, realizar, de forma automática, o mapeamento do uso e cobertura da terra, com abordagem na mineração das séries pelo método de agrupamento. A técnica permite avaliar a dinâmica dos diferentes grupos de vegetação frente ao regime pluviométrico da bacia. Os índices de vegetação utilizados neste estudo foram obtidos a partir do produto de refletância MOD09Q1 entre dois anos com regimes pluviométricos distintos: 2011 (ano chuvoso) e 2012 (ano seco). Foi realizada a mineração das séries temporais dos índices de EVI2 e IAF por meio da análise de agrupamento. Comparando a série para os dois anos, percebeu-se uma significativa diminuição dos índices de vegetação para o ano de 2012, cuja precipitação foi bem inferior ao ano anterior. Assim, conclui-se que a mineração das séries de IAF e EVI2 mostrou-se eficaz pelo método de agrupamento para o estudo da variabilidade que, para a área estudada, gerou grupos representativos de áreas de policultura e vegetação rasterira, cana-de-áçúcar, áreas de transição de mata, mata, água e região urbana.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, IAF, EVI2.

1. Introdução

O mapeamento dos índices de vegetação é de grande importância nos estudos em bacias hidrográficas, ajudando a estabelecer usos e ocupações sustentáveis (Oliveira et al., 2012). Como as mudanças climáticas e o uso e ocupação da terra vêm ocorrendo de forma acelerada (Tautenböck et

al., 2012), o monitoramento contínuo através de dados de satélites é extremamente necessário para acompanhar e quantificar tais mudanças. Nunes e Roig (2015) descrevem a importância do monitoramento em bacias hidrográficas, pois através da ocupação desordenada ocorrem processos erosivos, assoreamento de rios e reservatórios, diminuição da infiltração e, conseqüentemente, na

recarga de aquíferos, contaminação das águas, entre outros. O que se torna de fundamental importância o planejamento do uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas.

Nas últimas décadas, a utilização de técnicas de sensoriamento vem contribuindo de forma significativa para a geração dessas informações, tendo em vista a rapidez, eficiência e confiabilidade na identificação de alterações que ocorrem na superfície terrestre (Santos et al., 2015). Com essa finalidade, o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo dos satélites Terra (MOD) e Aqua (MYD), da NASA, tem ganhado cada vez mais destaque, pois a sua resolução temporal diária compensa a resolução espacial de seus produtos, que varia de 250, 500 a 1000 m e pode ser limitante em algumas aplicações.

Os Índices de Vegetação (IV) respondem à densidade da vegetação, cor e diferentes estados de umidade do solo e práticas de cultivo, devido à intensa absorção na região visível do espectro eletromagnético, em 0,475 μm e 0,65 μm , por parte da clorofila. A reflectância espectral da superfície terrestre fornece informações a respeito da presença da clorofila e das condições da vegetação (Paiva et al., 2011). Os IV realçam a componente espectral da vegetação por meio da combinação das bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo (Almeida et al., 2015). Dentre os vários índices de vegetação, destacam-se o Índice de Área Foliar (IAF) e o Índice de Vegetação Melhorado (EVI).

Ribeiro et al. (2016) analisaram a dinâmica temporal dos índices de vegetação na detecção de transformações ambientais na bacia hidrográfica do rio Pajeú para os anos de 2003, 2005, 2007, 2012, 2013, 2014 através de imagens do sensor MODIS e do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), índice de vegetação ajustado aos efeitos do solo (SAVI), EVI e IAF. Os autores concluíram que os índices de vegetação estudados são eficazes e eficientes na compreensão da dinâmica dos padrões espaciais, temporais e espectrais de ambientes semiáridos como o do Sertão nordestino. Formigoni et al. (2011) analisaram o comportamento temporal do EVI gerado com imagens MODIS, em diferentes tipos de vegetação do Nordeste brasileiro, no período de 2000 a 2006, e constataram que o EVI apresentou sensibilidade aos diferentes tipos de vegetação existentes na região. Para avaliar o desempenho do SAVI e NDVI, Rêgo et al. (2012) utilizaram imagens do sensor TM do satélite Landsat 5 para os anos de 2009 e 2010, e encontraram resultados satisfatórios no que diz respeito à representação da vegetação da região estudada. Zhang (2015) determinou o EVI2 (índice de vegetação melhorado) utilizando duas bandas espectrais (vermelho e infravermelho) e uma série temporal em longo prazo (1982-1999), do

sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), para reconstruir um conjunto de dados global.

Técnicas de classificação de imagens podem ser usadas para se obter os limites de determinadas regiões de interesse como biomas ou regiões agrícolas (Cordeiro et al., 2017). Para a avaliação de séries temporais de índices de vegetação, visando descoberta e estudo de padrões no desenvolvimento de culturas agrícolas, a análise de agrupamento (clustering) é a mais indicada. Essas técnicas são utilizadas para buscar grupos de padrões em conjuntos de dados de séries temporais, por meio de alguma medida de similaridade (Pimentel, 2014). Johann et al. (2013) descrevem que as técnicas estatísticas multivariadas, como agrupamentos ou clusters, é de alta relevância para que seja possível segmentar as séries temporais dos índices de vegetação, encontrando, desta forma, subgrupos com comportamento espectral homogêneo. Estas informações podem facilitar o uso de modelos de estimativa de produtividade espectrais regionalizados, adotando-se um único modelo por agrupamento, otimizando, assim, recursos humanos e computacionais (Johann et al., 2013). Existem dois tipos de medidas de proximidade: as medidas de similaridade (e dissimilaridade), que são especialmente adequadas quando os objetos são caracterizados por atributos qualitativos; e as distâncias, que são uma medida especial de dissimilaridade, utilizadas quando os objetos são caracterizados por atributos quantitativos (Gurgel, 2000).

Utilizando técnicas de agrupamento para índices de vegetação, temperatura e precipitação no Qinghai-Tibet Plateau, Zheng et al. (2018) concluíram que os resultados ajudam a analisar os efeitos ecológicos da mudança de clima e para realçar a compreensão das mudanças ecológicas no futuro. Gurgel et al. (2003) avaliaram os padrões espaciais e temporais de variabilidade, através da análise de agrupamento, do NDVI no Brasil, nas escalas anual e interanual e diagnosticaram as principais características associadas às mudanças em grande escala.

A bacia hidrográfica do Tapacurá está situada em uma zona de transição entre zona da mata e semiárido e há conflitos no uso da água, quais seja irrigação, abastecimento, indústria, entre outros. Procurar entender a dinâmica do uso e ocupação do solo ao longo do tempo é de fundamental importância para o adequado manejo da bacia hidrográfica. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo determinar os índices de vegetação IAF (índice de área foliar) e EVI2 (índice de vegetação melhorado) na bacia hidrográfica do rio Tapacurá, localizada no estado de Pernambuco, e por meio disso, realizar de

forma automática, o mapeamento do uso e cobertura da terra, com abordagem na mineração das séries de EVI2 e IAF pelo método de agrupamento, para avaliar a dinâmica dos diferentes grupos de vegetação frente ao regime pluviométrico da bacia.

2. Material e métodos

A área de estudo está localizada na bacia hidrográfica representativa do rio Tapacurá, situada no estado de Pernambuco entre as coordenadas 35° 30' 00" e 35° 5' 00" de longitude oeste e 8° 13' 00" e 7° 58' 30" de latitude sul, inserida na faixa de transição entre a Zona da Mata e o semiárido (Figura 1). A

bacia hidrográfica possui uma área de aproximadamente 480 km² e abrange seis municípios (Vitória de Santo Antão, Pombos, São Lourenço da Mata, Gravatá, Moreno e Chã Grande), apresentando conflitos de uso da água (abastecimento público, uso industrial, irrigação etc.). Nesta bacia localiza-se o reservatório de Tapacurá que tem capacidade máxima de 94.200.000 m³, sendo de grande importância para o abastecimento da Região Metropolitana do Recife (RMR), pois representa 36% do volume distribuído na região, abrangendo a Cidade do Recife, São Lourenço da Mata, Camaragibe e Jaboatão (COMPESA, 2016).

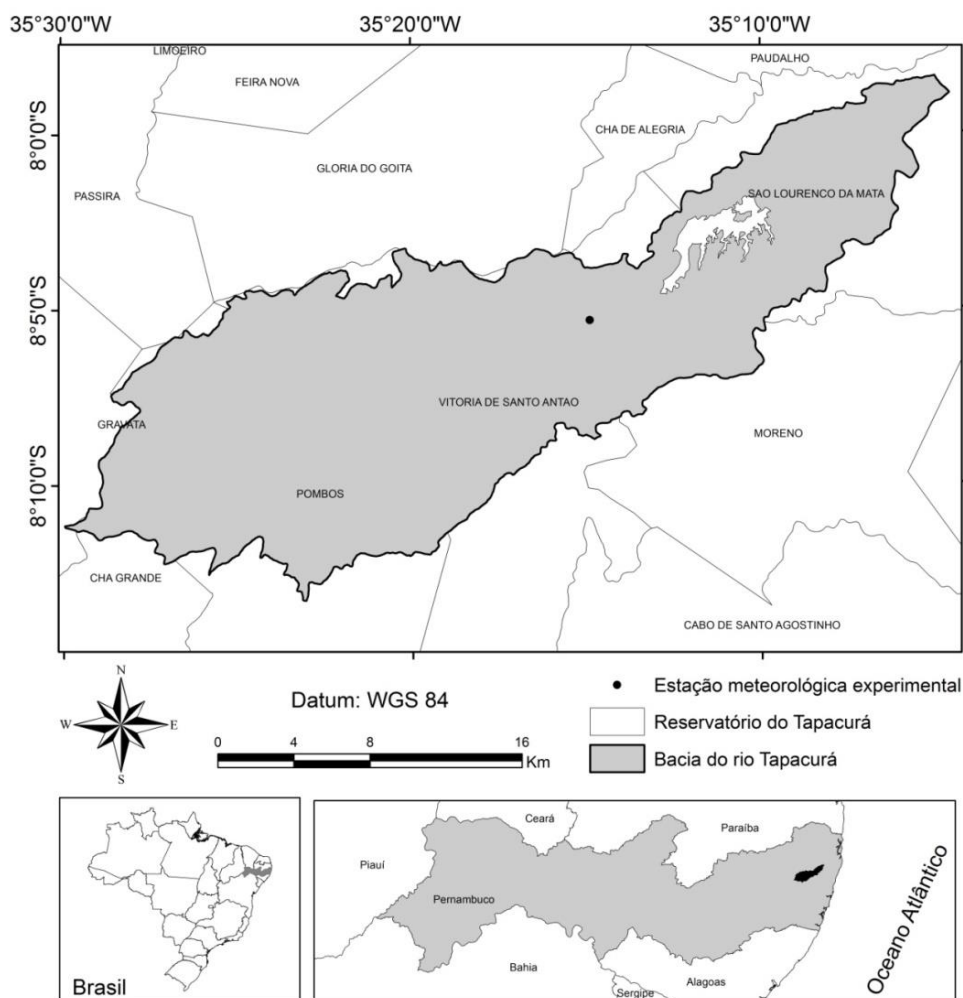


Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Tapacurá, PE, Brasil.

Para a determinação dos índices de vegetação nesta pesquisa, foi utilizado o produto MOD09Q1 (reflectância) proveniente do satélite Terra, referente a uma composição média de oito dias, com resolução espacial de 250 m. Esse produto é disponibilizado gratuitamente pela ferramenta Earth Explorer do USGS (*United States Geological Survey*), através do site <https://earthexplorer.usgs.gov>. Para facilitar o manuseio do produto, O MOD09Q1 possui a imagem global dividida em áreas georreferenciadas de 1.200

x 1.200 km, denominadas “tiles”, no formato HDF (*Hierarchical Data Format*). Apenas um tile, o h14_v09, foi necessário para cobrir toda área da bacia hidrográfica do rio Tapacurá.

Para o processamento das imagens, utilizou-se o software Erdas Imagine, e para montagem final dos layouts o ArcGis, ambos com licença do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

As condições atmosféricas da bacia do Tapacurá são de muita nebulosidade, especialmente na estação chuvosa, resultando em imagens com poucos pixels livres de nuvens. Para minimizar esse problema e fornecer mapas mensais dos índices de vegetação para a área de estudo, foi gerada composição mensal. Assim, foi realizada a seleção de pixels livres de nuvens, o que resultou em imagem mais limpa a cada trinta dias.

Com a finalidade de se obter os índices de vegetação de forma contínua, foram processados mapas para todos os produtos MOD09Q1 disponíveis, entre os anos de 2011 e 2012. Os anos em estudo foram escolhidos devido ao comportamento hidrológico para região, onde para o ano de 2011 obteve-se precipitação acima da média histórica registrada no local e 2012 abaixo da média, levando-se em consideração os meses de janeiro a agosto dos referidos anos.

Para acompanhar os índices de vegetação no período de estudo, foram analisados o IAF e o EVI, com duas bandas. O IAF é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação e por unidade de área utilizada por essa vegetação. Sendo um indicador da biomassa de cada pixel da imagem, esse índice foi computado pela equação empírica obtida por Allen et al. (2002) (Equação 1):

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (1)$$

no qual o SAVI (índice de vegetação ajustado aos efeitos do solo) representa um índice que busca amenizar os efeitos de fundo do solo. O referido índice foi obtido pela equação proposta por Huete (1988) (Equação 2):

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_2 - \rho_1)}{(L + \rho_2 + \rho_1)} \quad (2)$$

em que L é um fator de ajuste que depende do solo da área de estudo. Para esta pesquisa foi considerado L= 0,1, por resultar em IAF mais compatível com os obtidos em superfície, conforme Silva et al. (2011) e Allen et al. (2002); ρ_1 e ρ_2 correspondem às reflectâncias das bandas 1 e 2 do MOD09Q1.

O EVI fornece sensibilidade melhorada em regiões de biomassa alta, enquanto minimiza as influências do solo e atmosfera. Para o cálculo desse índice (Equação 3) foi utilizado o modelo proposto por Jiang et al. (2008), onde se é utilizado apenas duas bandas para o cálculo (banda 1 - vermelho e banda 2 - infravermelho próximo), excluindo da equação proposta anteriormente por Huete (1988), a faixa do azul. Essa mudança na obtenção do EVI é favorável, pois ter-se-á imagens com uma melhor resolução espacial (de 500 m para 250 m).

$$EVI2 = 2,5 \times \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + 2,4\rho_1 + 1,0} \quad (3)$$

em que ρ_1 e ρ_2 são, respectivamente, as reflectâncias das bandas 1 (vermelho) e 2 (infravermelho próximo) MOD09Q1.

Foi realizada a mineração das séries, que consiste no uso de técnicas inteligentes para extrair padrões de interesse (Souza et al., 2019; Brum et al., 2019). A técnica utilizada foi a Análise de Clusters (agrupamentos), que consiste em identificar agrupamentos de objetos que representam uma classe (Brum et al., 2019). Assim, as séries temporais do EVI2 e IAF foram obtidas por meio da análise de agrupamento, utilizando o software SAGA, do Departamento de Geografia da Universidade de Hamburgo.

O algoritmo utilizado para agrupamento foi k-médias do tipo Hill-Climbing, proposto por Rubin (1967), um método de classificação não supervisionado com k parâmetros de entrada que particiona n observações em k grupos. O k-médias foi empregado por ser um método muito utilizado para agrupamento em imagens de satélite (Lin et al., 2012; Petjean et al., 2012; Văduva et al., 2013; Cordeiro et al., 2017). O número de clusters (k) foi fornecido pelo usuário. Utilizando o valor médio dos elementos de cada grupo, o algoritmo recalculou iterativamente os centroides e redistribuiu todos os objetos até que não haja mais alterações nos agrupamentos (Han et al., 2001). A partir disso, foram extraídas as séries e realizados os agrupamentos para o período todo de 2011 a 2012.

3. Resultados e discussão

Os dados pluviométricos coletados na estação meteorológica experimental, situada no interior da bacia do Tapacurá, estão apresentados na Figura 2, que mostra os totais mensais da precipitação para os anos de 2011 e 2012 em comparação com a média mensal histórica (1957 – 1993). O ano de 2011 foi mais chuvoso em relação à média histórica, e o ano de 2012, mais seco. Para esse mesmo período, Coelho et al. (2017), através dos dados coletados na bacia do Ipanema situada no estado de Pernambuco, também caracterizaram o ano de 2011 como ano chuvoso e 2012 como ano seco. Em relação ao ano de 2012, só foram registradas precipitações até o mês de agosto devido ao problema no dispositivo de armazenamento de dados. No período chuvoso, que compreende os meses de março a julho, apenas a precipitação do ano 2011 está de acordo com a média histórica. Já o ano de 2012 teve registros inferiores para os meses de março a maio. Os totais precipitados até agosto de 2011 e 2012 foram de 1.670 mm e 802 mm, respectivamente.

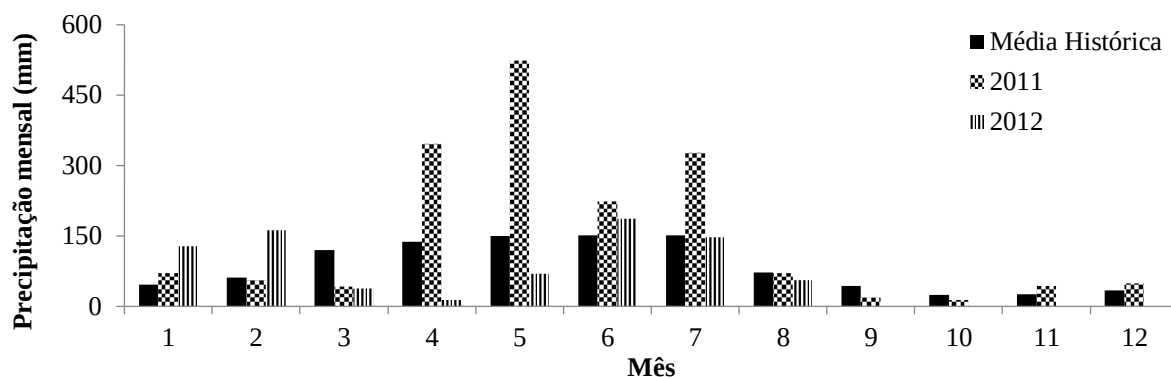


Figura 2 - Precipitação mensal para os anos de 2011 e 2012 em comparação com a média histórica.

As composições mensais do IAF para os anos de 2011 e 2012 são apresentadas nas Figuras 3 e 4, respectivamente. Para melhor visualização, as imagens do IAF serão apresentadas em médias trimestrais. Através da presente composição pode-se observar a diferença do IAF ao longo dos diferentes meses do ano, que acompanha diretamente o regime pluviométrico da região, identificando maiores quantidades de pixels com elevados valores de IAF para o período chuvoso, que compreende os meses de abril a julho. Comparando os anos estudados percebe-se uma significativa diminuição do IAF para todos os meses do ano de 2012 (ano seco) em comparação ao ano anterior, o que representa uma resposta da vegetação ao total precipitado. Ribeiro et al. (2016) descrevem a importância da avaliação conjunta entre as condições hidrometeorológicas e os parâmetros biofísicos da superfície, tendo em vista que a precipitação é o elemento chave para o desenvolvimento/regeneração da biomassa.

As imagens que apresentaram o maior valor de IAF foram as composições do segundo trimestre de 2011 e terceiro trimestre de 2012, onde uma grande parte da bacia apresentou valores maiores que $3,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, haja visto que foram os meses que tiveram o maior total mensal de precipitação. Pode-se observar que houve bastante variação nos valores do IAF para área da estação meteorológica experimental. Oliveira (2012) encontrou para o mesmo local, no período de março de 2010 a junho de 2011, valores que alternaram entre $0,407$ a $2,474 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Danelichen et al. (2016) avaliaram o IAF de uma floresta de transição Amazônia-Cerrado, através da metodologia proposta por Allen et al. (2002) com o sensor TM/Landsat 5 e o produto MOD15A2 do MODIS, tendo melhor resultado com o produto MODIS, uma vez que os valores ficaram situados entre $4,2$ a $6,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, mais representativos para a área.

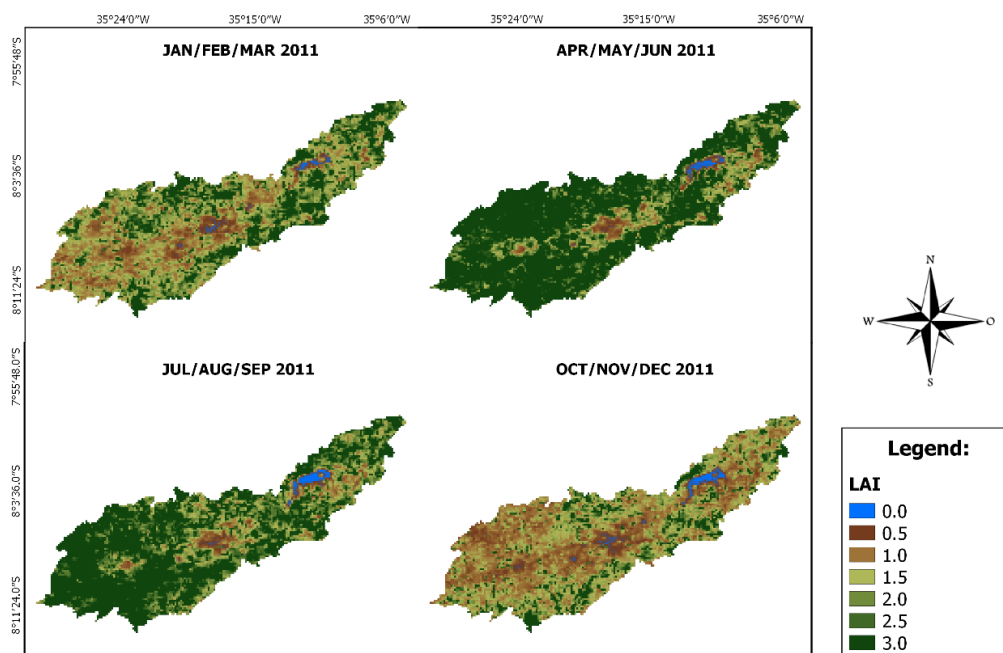


Figura 3 – Composição mensal do do Índice de Área Foliar (IAF) para os meses do ano de 2011.

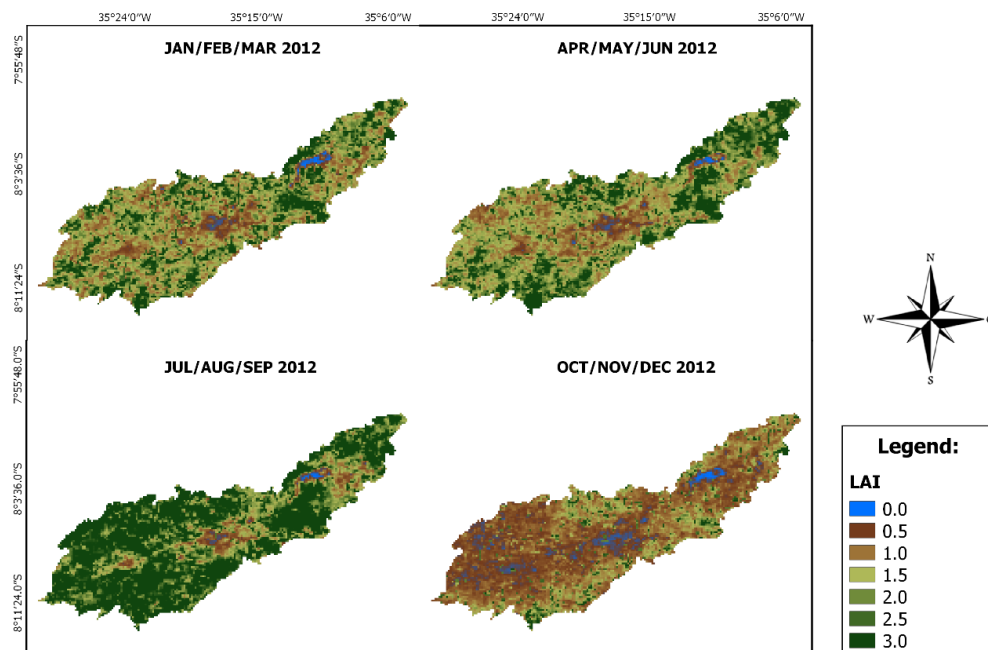


Figura 4 - Composição mensal do Índice de Área Foliar (IAF) para os meses do ano de 2012.

Os resultados obtidos dos agrupamentos do IAF para o período analisado de 2011 a 2012 podem ser observados na Figura 5. O grupo de cor magenta indica que esta é uma região de água ou área urbana, com valores situados entre 0 e 1 $m^2 m^{-2}$, representado pelo reservatório de Tapacurá e áreas urbanas, como o município de Vitória de Santo Antão, na parte central, e de Pombos, na porção oeste da imagem. Essas áreas urbanas aparecem definidas para todas as

composições mensais e para os diferentes anos estudados. O grupo amarelo corresponde às áreas de vegetação rasteira e policultura, o grupo de tom verde representa áreas de cultivo de cana-de-açúcar, o grupo azul são áreas de transição de vegetação aberta para vegetação densa. O grupo vermelho constitui áreas de mata e vegetação densa, no qual pode-se observar poucos pixels. Estas áreas são correspondentes a fragmentos da Mata Atlântica.

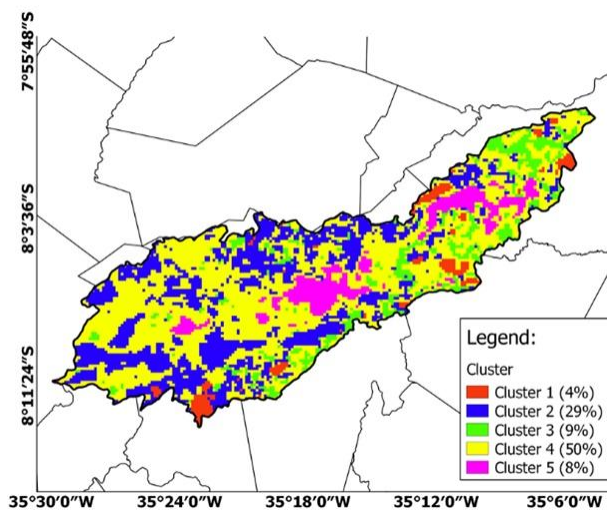


Figura 5. Mapa dos agrupamentos e gráfico dos centroides resultantes da análise para as series do Índice de Área Foliar (IAF).

As composições mensais do EVI2 para o ano de 2011 e 2012 podem ser observadas nas Figuras 6 e 7, respectivamente. As classes do EVI2 se situaram entre 0,1 a 0,6, no qual os padrões do EVI2 se mantiveram em relação ao IAF, com diminuição para

o ano de 2012 em relação ao ano anterior. Percebeu-se que onde foram registrados maiores valores de IAF foram também registrados maiores valores do EVI2, da mesma forma ocorreu com o inverso.

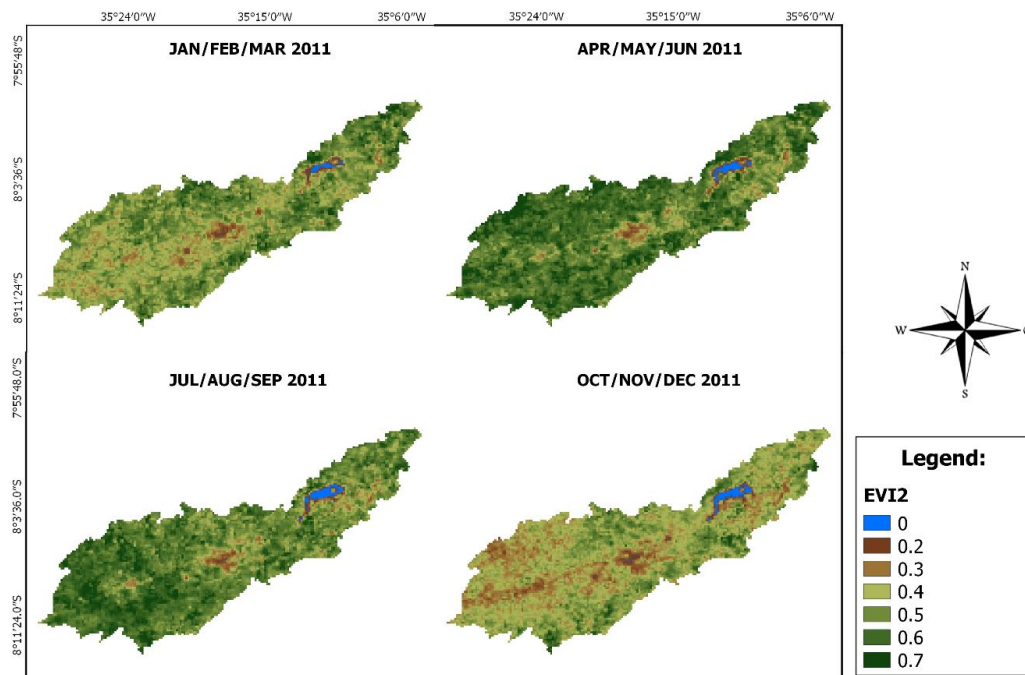


Figura 6 - Composição mensal do Índice de Vegetação Melhorado (EVI2) para os meses do ano de 2011.

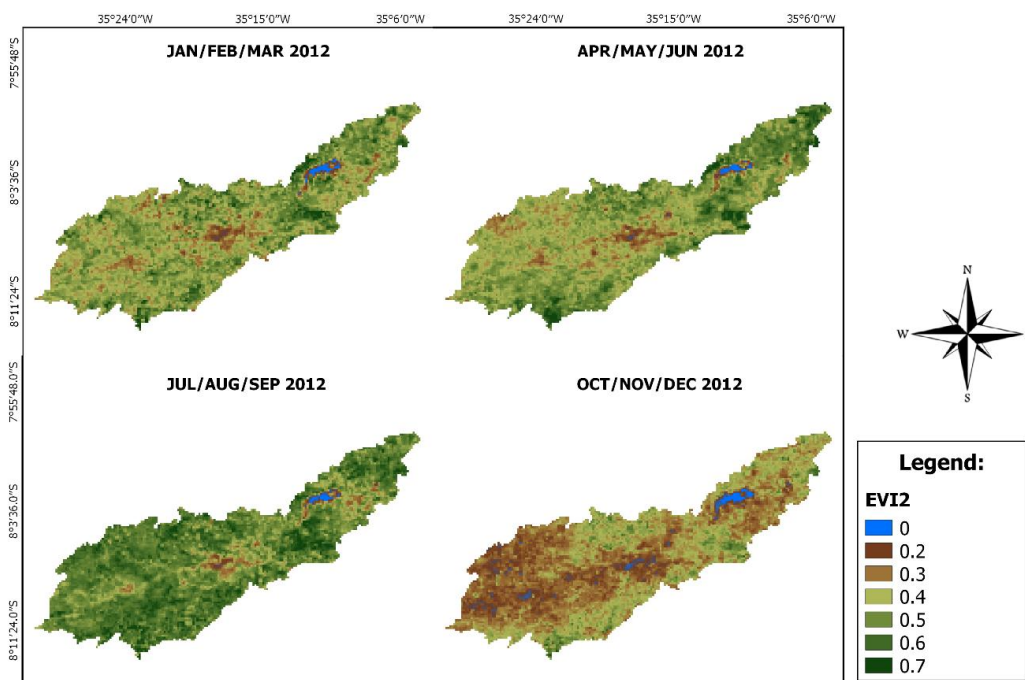


Figura 7 - Composição mensal do Índice de Vegetação Melhorado (EVI2) para os meses do ano de 2012.

Os valores menores que 0,1 (cluster 5) correspondem à área do reservatório do Tapacurá, e maiores que 0,6 (cluster 1) estão diretamente associados ao maior vigor e densidade da cobertura vegetal. Mondal (2011) determinou o EVI2 para um reserva florestal localizada em Maharashtra, parte central da Índia, onde para uma subárea inserida totalmente na reserva obteve valores entre 0,56 e 0,44. De acordo com Durán (2014), os constituintes da área urbana refletem fortemente no verde, vermelho e infravermelho próximo, e o contraste

entre as áreas urbanas e áreas com vegetação é notável, visto que áreas com vegetação aparecem em vermelho brilhante em composições coloridas e falsa cor, por serem elementos que refletem muita energia no infravermelho e a absorvem no verde e vermelho.

Os valores menores que 0,1 do EVI2 correspondem à área do reservatório de Tapacurá, exceto para os meses de outubro a dezembro de 2012, que apresentaram poucos pixels distribuídos na imagem que abrange a bacia hidrográfica em estudo, devido à presença de nuvens que é captada pelos

sensores do satélite. Em áreas urbanas, os valores ficaram em sua grande maioria entre 0,1 e 0,3, com poucos pontos na classe de 0,3 a 0,4 no período chuvoso, valores que fazem parte do cluster 5. Valores semelhantes foram obtidos por Oliveira et al. (2012) para a bacia do Tapacurá, que através do satélite TM/Landsat 5 encontraram para áreas urbanas, da cidade de Vitória de Santo Antão e Pombos, o EVI entre 0,0 a 0,4, para os anos de 2005 e 2007.

No período chuvoso os valores para áreas agrícolas e pastagens variaram, na maior parte, entre 0,4 e 0,6, correspondendo ao cluster 4, para os meses

de maio, junho, agosto e setembro de 2011. Já para o ano de 2012, esta classe pode ser encontrada apenas nos meses de julho e agosto. Para os demais meses, a classe predominante foi entre 0,2 e 0,5, valores semelhantes aos encontrados por Zhang (2015), ao determinar para toda a América do Norte o EVI2, evidenciando diferenças entre diferentes biomas por um longo período (entre 1982 a 1999), por meio de dados do sensor AVHRR/NOAA. Os valores variaram aproximadamente entre 0,15 e 0,45 para áreas de cultivo agrícola, e em torno de 0,15 a 0,6 para áreas de pastagem.

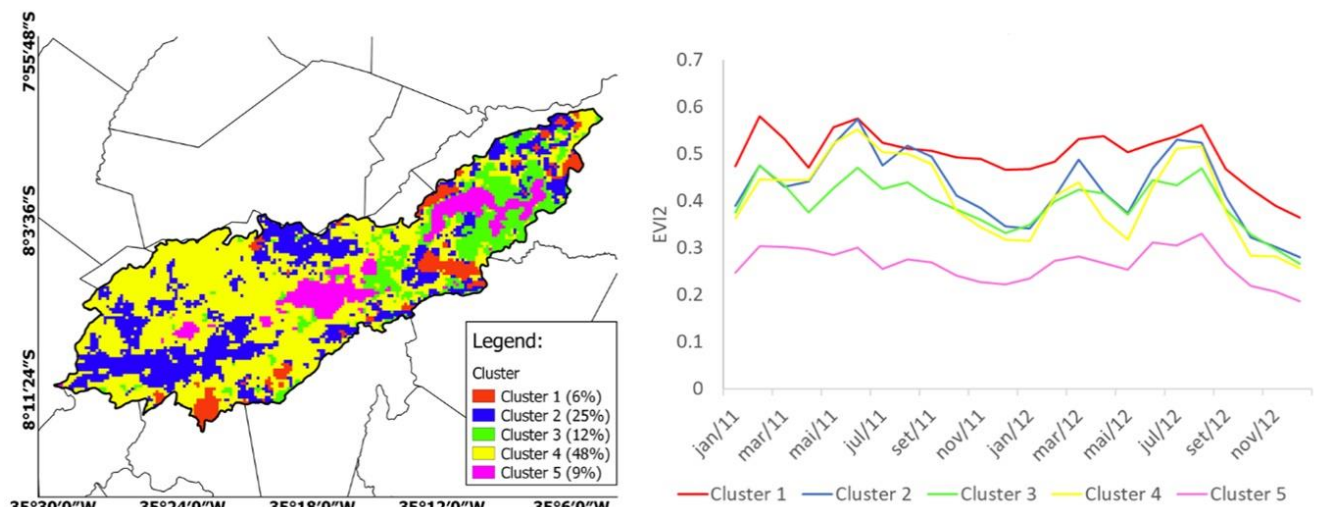


Figura 8- Mapa dos agrupamentos e gráfico dos centroides resultantes da análise para as series do EVI2.

Nas áreas que representam os grupos 2, 3, 4 (áreas com vegetação rasteira, policultura, pastagem, cana-de-açúcar e áreas de transição de mata) observa-se uma maior variabilidade dos centroides influenciada pela estação chuvosa e estação seca. No fim do ano de 2012 houve decréscimo do EVI de até 0,35 em todos os grupos, em virtude do baixo índice de precipitação.

A relação dos centroides resultantes da análise para as séries de IAF e EVI2 com a precipitação são apresentados nas Figuras 9 e 10, onde as linhas coloridas representam o ajuste da linha de tendência entre a precipitação e cada classe de uso e cobertura da terra, obtida a partir de uma equação de regressão linear simples.

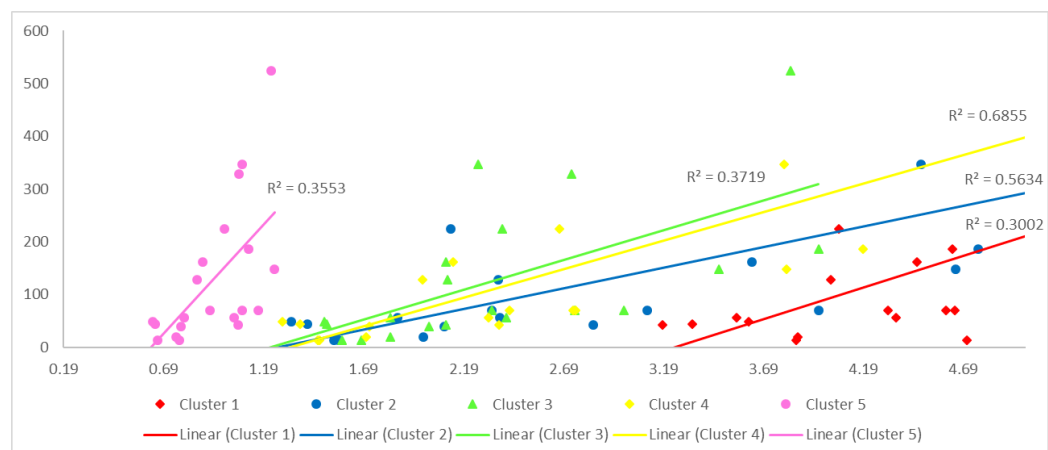


Figura 9- Relação da precipitação com centroides resultantes da análise para as series do Índice de Área Foliar (IAF).

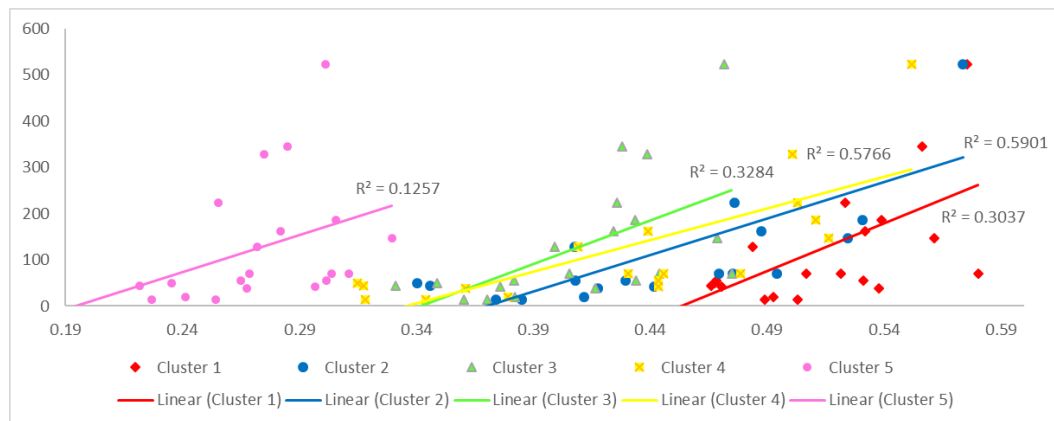


Figura 10- Relação da precipitação com centroides resultantes da análise para as séries do Índice de Vegetação Melhorado (EVI2).

Para análise dos centroides resultantes das séries do IAF com a precipitação foram obtidos valores dos coeficientes de regressão (r^2). Os valores dos grupos 2 e 4 (policultura, vegetação rasteira e transição de mata) foram os agrupamentos que mais evidenciaram a variabilidade da vegetação de acordo a sazonalidade da precipitação, com coeficientes de correlação próximos a 0,56 e 0,69, respectivamente. Já para os centroides resultantes das séries do EVI2 com a precipitação foram obtidos os melhores resultados de r^2 grupos 2 e 4, com valores de 0,59 e 0,58, respectivamente. Os valores dos coeficientes de regressão descritos confirmam que as classes de uso e cobertura da terra na área de estudo apresentam um padrão sazonal relacionado com a sazonalidade da precipitação e que a floresta é a única classe que tem um comportamento diferenciado, com a precipitação não tendo uma relação direta com a cobertura vegetal.

Nas áreas que representam os grupos 1 e 2 (floresta e cana-de-açúcar), a análise dos índices de EVI e IAF indicaram que não houve decréscimos significativos durante o período de estiagem. No caso da classe floresta, a pequena queda da fitomassa foliar pode ser explicada pela disponibilidade hídrica atingida pelas raízes profundas destas árvores ou pela proximidade de cursos de rios (Gurgel et al., 2003).

Becerra et al. (2009) encontraram coeficientes de regressão (r^2) das classes floresta, cerrado, campo cerrado, agricultura e agricultura-pastagem foram 0,0007; 0,7357; 0,3093; 0,6151; 0,5475 e 0,7518, respectivamente. Os valores dos coeficientes de regressão obtidos pelos autores corroboram com os resultados apresentados pelo presente estudo, tendo em vista que os maiores valores obtidos se encontraram em agricultura-pastagem.

4. Conclusões

Os índices de vegetação apresentaram valores maiores para o ano de 2011 (ano chuvoso) em relação ao ano de 2012 (ano seco). A inclusão de dados de

precipitação, na interpretação do comportamento sazonal da vegetação na bacia hidrográfica do rio Tapacurá, permitiu compreender de forma mais exata a dinâmica sazonal de diferentes classes de uso e cobertura.

O índice IAF mostrou maior relação com a precipitação no agrupamento que representa áreas de policultura e vegetação rasteira, enquanto que o EVI apresentou maior relação no agrupamento que representa área de transição de mata. O IAF também mostrou melhor separabilidade e identificação dos grupos ao longo do ciclo anual. A mineração das séries de IAF e EVI, pelo método de agrupamento, produziu grupos representativos de áreas de policultura e vegetação rasteira, cana-de-açúcar, áreas de transição de mata, mata, água e região urbana.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FACEPE, CAPES e CNPq pelas bolsas de doutorado, pós-doutorado e pesquisador DTI-B. Universal do CNPq (Proc. 448236 / 2014-1), pela bolsa Produtividade e Pesquisa/PQ - CNPq proc. 313392/2020-0 da quinta autora. Aos projetos SUPER-CNPq (Proc. 446254/2015), Universal MCTIC/CNPq 28/2018 (Proc. 431980/2018-7), PEGASUS MCTI / CNPq Nº 19/2017 (Proc. 441305/2017-2), CNPq/MCTIC/BRICS 29/2017 (Proc. 442335/2017.2) e ao INCT Mudanças Climáticas II. A FACEPE pelo consórcio UNIVERSITAS (APQ-0300-5.03/17) e os projetos APQ-0885-3.01/16 e BCT-0240-3.01/17. A CAPES pelo auxílio pesquisa n. 88881.159246/2017-01.

Referências

Allen, R.G., Waters, R., Trezza, R., Tasumi, M., Bastiaanssen, W., 2002. SEBAL - Surface Energy Balance Algorithms for Land: Idaho implementation: advance training and user

- manual. Moscow: Idaho Department of Water Resources.
- Almeida, AD., Ribeiro, A., Delgado, R.C., Rody, Y.P., Oliveira, A.D., Leite, F. P., 2015. Índice de área foliar de Eucalyptus estimado por índices de vegetação utilizando imagens TM-Landsat 5. *Floresta e Ambiente* 3, 368 – 376.
- Becerra, J.A.B., Shimabukuro, Y.E., Alvalá, R.D.S., 2009. Relação do padrão sazonal da vegetação com a precipitação na região de Cerrado da Amazônia Legal, usando índices espectrais de vegetação. *Revista Brasileira de Meteorologia* 2, 125 – 134.
- Brum, F., Mozzaquatro, P.M., Zanatta, J.M., 2019. Estudo sobre os Algoritmos de clusterização hierarchical clusterer e simple K-Means aplicados no agrupamento de padrões similares. *Revista da Universidade Vale do Rio Verde* 17, 1 – 9.
- Coelho, V.H.R., Montenegro, S., Almeida, C.N., Silva, B.B., Oliveira, L.M., Gusmão, A.C.V., Freitas, E.S., Montenegro, A.A., 2017. Alluvial groundwater recharge estimation in semi-arid environment using remotely sensed data. *Journal of Hydrology* 548, 1 – 15.
- COMPESA. Companhia Pernambucana de Saneamento, 2016. Disponível: <http://servicos.compesa.com.br/wp-content/uploads/2016/01/tapacura.pdf>. Acesso: 15 jul. 2019.
- Cordeiro, A.P.A., Berlato, M.A., Fontana, D.C., Melo, R.W., Shimabukuro, Y.E., Fior, C.S., 2017. Regiões homogêneas de vegetação utilizando a variabilidade do NDVI. *Ciência Florestal* 27, 883 – 896.
- Danelichen, V.H.M., Biudes, M.S., Machado, NG., 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 1352 – 1360.
- Durán, GY.B., 2014. Estudo da resposta espectral de alvos urbanos com espectroscopia de reflectância e imagens de alta resolução espacial. Dissertação (Mestrado). Santa Maria, UFSM.
- Formigoni, M.H., Xavier, A.C., Lima, J.S.deS., 2011. Análise temporal da vegetação na região do Nordeste através de dados EVI do MODIS. *Ciência Florestal* 21, 1 – 8.
- Gurgel, H.C., 2000. Variabilidade espacial e temporal do NDVI sobre o Brasil e suas conexões com o clima. Dissertação (Mestrado). São José dos Campos, INPE.
- Gurgel, H.C., Ferreira, N.J., Luiz, A.J.B., 2003. Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil, utilizando-se a análise de agrupamentos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 7, 85 – 90.
- Han, J., Kamber, M., Tung, A.K.H., 2001. Spatial clustering methods in data mining: a survey, in: Miller, H.J., Taylor, J., Francis (Ed.), *Geographic Data Mining and Knowledge Discovery*, pp. 201 – 230.
- Huete, A.R., 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25, 295 – 309.
- Jiang, Z., Huete, A.R., Didan, K., Miura, T., 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment* 112, 3833 – 3845.
- Johann, J.A., Araújo, E.C., Uribe-Opazo, M.A., 2013. Análise de agrupamento da variabilidade espacial da produtividade da soja e variáveis agrometeorológicas na região oeste do Paraná. *Engenharia Agrícola* 33, 782 – 795.
- Lin, J., Williamson, S., Borne, K., Debarr, D., 2012. Pattern recognition in time series. *Advances in Machine Learning and Data Mining for Astronomy*, Citeseer 1, 617 – 645.
- Mondal, P., 2011. Quantifying surface gradients with a 2-band Enhanced Vegetation Index (EVI2). *Ecological Indicators* 11, 918 – 924.
- Nunes, J.F., Roig, H.L., 2015. Análise e mapeamento do uso e ocupação do solo da Bacia do Alto do Descoberto, DF/GO, por meio de classificação automática baseada em regras e lógica nebulosa. *Revista árvore* 39, 25 – 36.
- Oliveira, L.M.M., 2012. Estimativa da evapotranspiração real por sensoriamento remoto na Bacia do Rio Tapacurá-PE. Tese (Doutorado). Recife, UFPE.
- Oliveira, L.M.M., Montenegro, S.M.G.L., Antonino, A.C.D., Silva, B.B., Machado, C.C.C., Galvêncio, J.D., 2012. Análise quantitativa de parâmetros biofísicos de bacia hidrográfica obtidos por sensoriamento remoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 47, 1209 – 1217.
- Paiva, C.M., França, G.B., Liu, W.T.H., Rotunno Filho, O.C., 2011. A comparison of experimental energy balance components data and SEBAL model results in Dourados, Brazil. *International Journal of Remote Sensing* 32, 1731 – 1745.
- Petitjean, F., Kurtz, C., Passat, N., Gancarski, P., 2012. Spatio-temporal reasoning for the classification of satellite image time series. *Pattern Recognition Letter* 33, 1805 – 1815.
- Pimentel, T.R.G., 2014. Classificação de padrões temporais de uso do solo e cobertura da terra em séries temporais de índice de vegetação utilizando um sistema neuro-difuso. Pós-Graduação em Computação Aplicada. São José dos Campos, INPE.
- Rêgo, S.C.A., Lima, P.P.S., Lima, M.N.S., Monteiro, T.R.R., 2012. Análise comparativa dos índices de vegetação NDVI e SAVI no município de São

- Domingos do Cariri-PB. *Revista Geonorte* 3, 1217 – 1229.
- Ribeiro, E.P. Nóbrega, R.S. Mota Filho, F.O. Moreira, E.B., 2016. Estimativa dos índices de vegetação na detecção de mudanças ambientais na bacia hidrográfica do rio Pajeú. *Geosul* 31, 59 – 92.
- Rubin, J., 1967. Optimal Classification into Groups: An Approach for Solving the Taxonomy Problem. *Theoretical Biology* 15, 103 – 144.
- Santos, F.A.C., Santos, C.A.C., Silva, B.B., Araújo, A.L., Cunha, J.E.B.L., 2015. Desempenho de metodologias para estimativa do saldo de radiação a partir de imagens MODIS. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 30, 295 – 306.
- Silva, B.B., Braga, A.C., Braga, C.C., 2011. Balanço de radiação no perímetro irrigado São Gonçalo – PB mediante imagens orbitais. *Revista Caatinga* 24, 145 – 152.
- Souza, R.S., Hisatugu, W.H., Dores Rissino, S., 2019. Perfil das ocorrências pliciais da cidade de Itamaraju-BA utilizando técnicas de mineração de dados. *Brazilian Journal of Production Engineering-BJPE* 5, 66 – 81.
- Taubenbock, H., Esch, T., Felbier, A., Wiesner, M., Roth, A., Dech, S., 2012. Monitoring urbanization in mega cities from space. *Remote sensing of Environment* 117, 162 – 176.
- Vaduva, C., Costachioiu, T., Patrascu, C., Gavat, I., Lazarescu, V., Datcu, M., 2013. A latent analysis of earth surface dynamic evolution using change map time series. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions* 51, 2105 – 2118.
- Zhang, X., 2015. Reconstruction of a complete global time series of daily vegetation index trajectory from long-term AVHRR data. *Remote Sensing of Environment* 156, 457-472.
- Zheng, Y., Han, J.; Huang, Y., Fassnacht, S.R., Xie, S., Lv, E., Chen, M., 2018. Vegetation response to climate conditions based on NDVI simulations using stepwise cluster analysis for the Three-River Headwaters region of China. *indicators* 92, 18 – 29.