


Artigo

Evolução Espaço-Temporal do Risco de Degradação da Cobertura Vegetal de Petrolina-PE

Douglas Alberto de Oliveira Silva¹ , Fabrício Marcos Oliveira Lopes¹,
Geber Barbosa de Albuquerque Moura¹, Ênio Farias de França e Silva¹,
Jhon Lennon Bezerra da Silva¹, Alan Cezar Bezerra²

¹*Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.*

²*Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra Talhada, PE, Brasil.*

Recebido em: 15 de Agosto de 2017 - Aceito em: 19 de Dezembro de 2017

Resumo

A disponibilidade de imagens de satélites em diferentes resoluções espacial, temporal, radiométrica e espectral estão sendo empregadas para monitorar grandes áreas dos diversos biomas existentes no mundo. O monitoramento por imagens orbitais possibilita detectar, analisar e inferir sobre alterações da superfície da Terra provocadas por processos naturais ou antrópicos. Objetivou-se com o presente estudo monitorar e analisar a evolução espacial e temporal na ocupação e uso da terra no Município de Petrolina, Pernambuco, Brasil, utilizando-se dados de superfície e imagens do Landsat-8, para os anos de 2013 a 2015. Técnicas de sensoriamento remoto foram utilizadas para estimar o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), albedo da superfície (α) e Índice de Desvio Padrão Móvel (MDSI). A técnica de detecção de mudança e a classificação por árvore de decisão baseadas em regras predefinidas no NDVI, albedo e MDSI foram aplicadas para inferir sobre ocupação e uso da terra. Os resultados mostraram que os índices de vegetação e as técnicas de monitoramento da degradação e detecção de mudanças identificaram satisfatoriamente o comportamento da vegetação circundante no Município de Petrolina, destacando-se como indicadores de áreas em processo de degradação no semiárido. Conclui-se que a técnica de detecção de mudança e classificação por árvore de decisão foram eficientes na identificação de áreas antropizadas durante o período de estudo.

Palavras-chave: Caatinga, albedo, NDVI, detecção de mudanças, agrometeorologia.

Spatial-Temporal Evolution of the Degradation Risk of Vegetable Coverage of Petrolina-PE

Abstract

The availability of satellite images at different spatial, temporal, radiometric and spectral resolutions is being used to monitor large areas of the various biomes in the world. The orbital image monitoring allows to detect, analyze and infer about changes in the surface of the Earth caused by natural or anthropic processes. The objective of this study was to monitor and analyze spatial and temporal evolution in land use and occupation in the Municipality of Petrolina, Pernambuco, Brazil, using surface data and Landsat-8 images for the years 2013 to 2015. Remote sensing techniques were used to estimate Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), surface albedo (α) and Mobile Standard Deviation Index (MDSI). The technique of detection of change and the classification by decision tree based in predefined rules in the NDVI, MSDI and surface albedo were applied to infer about occupation and land use. The results showed that the vegetations indexes and degradation monitoring and change detection techniques satisfactorily identified the behavior of the surrounding vegetation in the Municipality of Petrolina, highlighting the indicators of degraded areas in the semi-arid region. It was concluded that the technique of detection of change and classification by decision tree were efficient in the identification of anthropic areas during the three years studied.

Keywords: Caatinga, albedo, NDVI, change detection, agrometeorology.

1. Introdução

O Bioma Caatinga possui uma área aproximada de 826.411 km² e se estende por todo o Nordeste, representando 83% do estado de Pernambuco (IBGE, 2015). Ao longo da história, a Caatinga vem sendo explorada de maneira não sustentável, acelerando seu processo de degradação, conduzindo-a a sucessão secundária e, conseqüentemente a desertificação, mas acredita-se, ainda, que boa parte dela é passível de recuperação (Silva *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2016). O Município de Petrolina está inserido na Caatinga, sendo predominantemente rural, pois a população retira a sua sustentabilidade das agriculturas irrigadas, de sequeiro e também do extrativismo vegetal, modificando cada vez mais o bioma.

As imagens do satélite Landsat-8 de sensor OLI (*Operational Land Images*) transformadas a partir dos seus níveis de cinza em refletâncias, Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e albedo da superfície são utilizadas para identificar e avaliar mudanças na estrutura, fisionomia e dinâmica da cobertura vegetal através de diferentes datas (Oliveira, 2015; Silva *et al.*, 2016). No entanto, a precipitação pluvial antes da passagem do satélite, as áreas sombreadas por encostas íngremes e a rugosidade do terreno afetam a resposta espectral das imagens orbitais (Ponzoni *et al.*, 2010; Caten *et al.*, 2015).

Vários estudos têm mostrado que a precipitação antes da passagem do satélite influencia no comportamento espectral da cobertura vegetal da Caatinga. Bustamante *et al.* (2012) observaram que o crescimento anual da Caatinga tem relação direta com a sazonalidade da precipitação. Arraes *et al.* (2012) ressaltam que o aumento do NDVI se relaciona com a umidade do solo dos meses anteriores. Francisco *et al.* (2012) também afirmam que a umidade antecedente influencia nas respostas espectrais de imagens Landsat-5 e que pela análise da diferença espectral da vegetação pode-se separar as fisionomias da área em classes de Caatinga.

A heterogeneidade espectral pode ser trabalhada utilizando a classificação por Árvore de Decisão - AD (Ruiz *et al.*, 2014). O uso dessa técnica é recomendado devido à flexibilidade, simplicidade, intuitividade e cálculos eficientes (Vorovencii, 2015). O classificador AD tem sido aplicado baseado em regras preestabelecidas nas mudanças na cobertura ou biomassa vegetal (índices de vegetação), na heterogeneidade da vegetação (Índice de Desvio Padrão Móvel – MSDI) e nas condições micrometeorológicas da vegetação (albedo da superfície) para mapear áreas sob risco de degradação ambiental. Xu *et al.* (2009) usaram o NDVI, MSDI e albedo da superfície para avaliar e classificar o grau de mudança na cobertura vegetal, no Planalto de Ordos, na China, com imagens dos Landsat-4, 5 e 7, em escala regional. Ottinger *et al.* (2013) utilizaram o

algoritmo AD para avaliar a conversão da cobertura da terra natural em áreas de agricultura intensiva e em área urbana, no delta do Yellow River, na China, com imagens Landsat-5. Caten *et al.* (2015) empregaram o classificador AD para analisar a dinâmica da cobertura da terra entre os anos de 1989 e 2011, na bacia hidrográfica do rio Marombas, Santa Catarina. Vorovencii (2015) aplicou o classificador AD baseado no albedo, no MSDI e o SAVI modificado obtidos do Landsat-5 para avaliar o risco de desertificação na Romênia entre 1987 e 2011.

Deste modo, este trabalho objetivou monitorar e analisar o risco de alterações do uso e ocupação da terra em Petrolina-PE, usando imagens Landsat-8 de sensor OLI (*Operational Land Imager*) adquiridas nos anos de 2013, 2014 e 2015. Além disso, a técnica de detecção de mudança e a classificação por árvore de decisão baseadas em regras predefinidas no NDVI, albedo e MSDI foram aplicadas para inferir sobre ocupação e uso da terra.

2. Material e Métodos

A área de estudo abrange o Município de Petrolina-PE (7°37'35" S a 9°43'56" S; 41°12'11" W a 39°7'27" W; altitude média de 370 m) (Fig. 1), pertencente a Mesorregião do São Francisco Pernambucano, estando à aproximadamente 714 km da capital Recife. O Município está inserido na região semiárida do Estado de Pernambuco, situado na depressão sertaneja, com um relevo suave-ondulado, integrando um importante polo da fruticultura nacional. De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, Petrolina está em uma região que apresenta o clima do tipo BSw'h' – semiárido quente e seco, com a ocorrência de duas estações bem definidas: estação seca entre os meses de maio a outubro e estação chuvosa entre os meses de novembro a abril. Apresenta uma precipitação pluviométrica média de 567 mm ano⁻¹ com uma distribuição espacial irregular, temperatura média anual de 26,3 °C e umidade relativa do ar de 58% (Alvares *et al.*, 2013).

Os dados meteorológicos diários da precipitação pluvial foram coletados e registrados pela Estação Meteorológica Automática (EMA) localizada na própria área de estudo nas coordenadas geográficas: 9°22'45,12" S e 40°28'47,25" W, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o período de 2013 a 2015. Além disso, foram utilizados os totais anuais dos anos de 1993 a 2016 para selecionar anos extremos de precipitação, utilizando o Índice de Anomalias de Chuvas (IAC) proposto por Van Rooy (1965) e, posteriormente adaptado por Freitas (1998), a fim da obtenção das anomalias positivas e negativas (Eqs. 1 e 2).

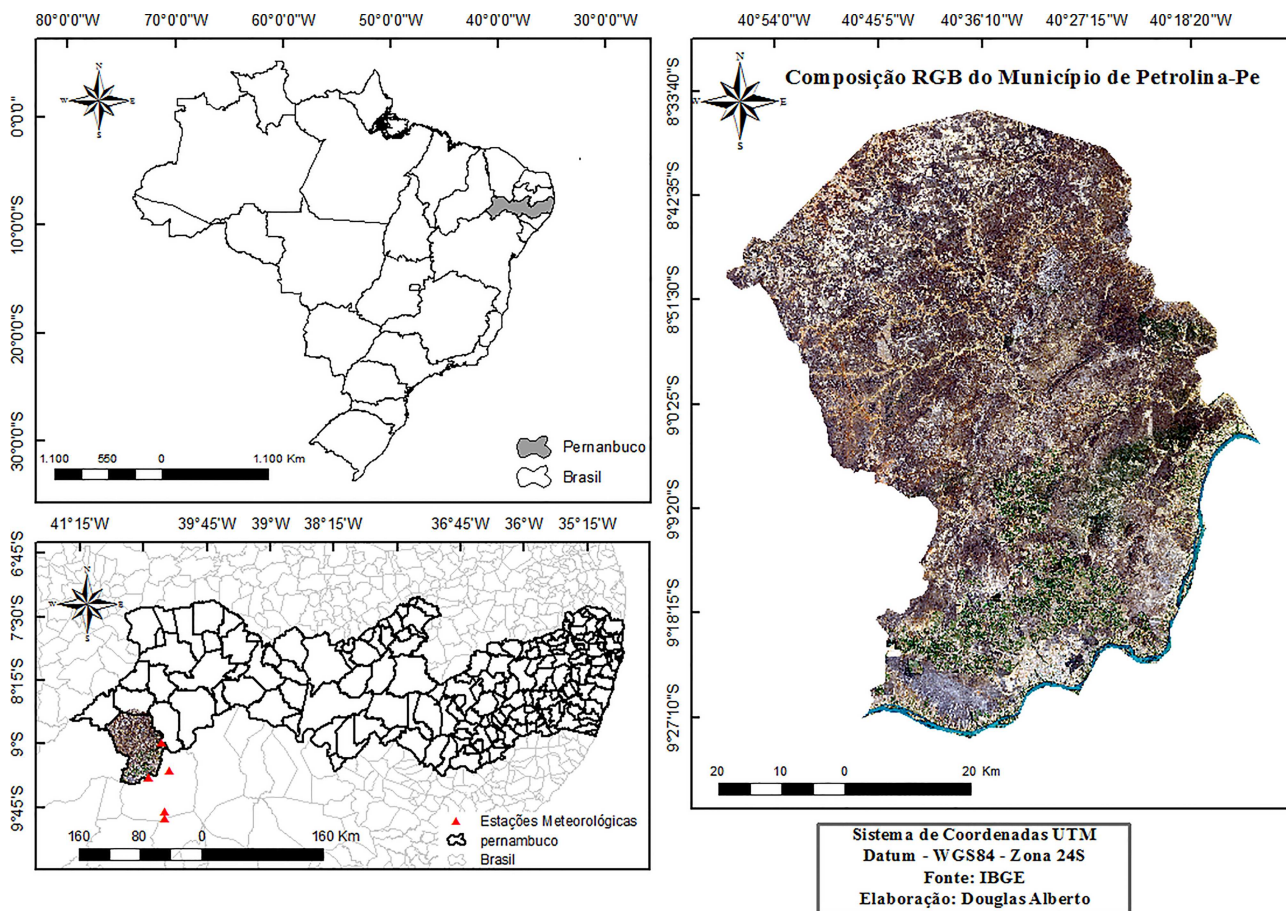


Figura 1 - Mapa espacial de localização do Município de Petrolina, Pernambuco, Brasil.

$$IAC = 3 \times \left[\frac{N - \bar{N}}{M - \bar{N}} \right] \quad (1)$$

$$IAC = -3 \times \left[\frac{N - \bar{N}}{X - \bar{N}} \right] \quad (2)$$

em que: N - precipitação anual atual (mm), \bar{N} - precipitação média da série histórica (mm), M - média das dez maiores precipitações anuais da série histórica (mm) e X - média das dez menores precipitações anuais da série histórica (mm).

A partir dos valores encontrados, o regime de chuva foi classificado de acordo com a metodologia do IAC apresentada na Tabela 1. Para realização da disposição dos Municípios em termos de IAC, foi utilizada a classificação elaborada por Van Rooy (1965) para os anos secos e chuvosos. A classificação é feita de acordo com os valores registrados para o IAC (Tabela 1).

As bandas multiespectrais do Landsat-8 OLI foram adquiridas na base de dados espaciais americana da NASA/USGS (*National Aeronautics and Space Administration/United States Geological Survey*), possuem

resolução espacial de 30 m (bandas 2 a 7) e resolução radiométrica de 16 bits, aumentando o grau de detalhamento das informações geradas. As cenas que cobrem a área de estudo, possuem órbita 217 e pontos 66 e 67, e foram escolhidas na condição de céu claro com menor presença de nuvens possível (<10%) e pertencentes ao mesmo período do ano, passando sobre o local aproximadamente às 09h45min (hora local). A correção atmosférica das imagens do Landsat-8 foi realizada utilizando o modelo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) (Felde *et al.*, 2003), informando dados de entrada como data, horário, local da passagem do Landsat-8, modelo atmosférico tropical, aerossol continental e visibilidade atmosférica horizontal. A visibilidade horizontal atmosférica (VIS) foi estimada invertendo-se a Eq. 3 (Deschamps *et al.*, 1981).

$$\beta = 0,613 \times e^{-VIS/15} \quad (3)$$

em que β = coeficiente de Angström. Considerou-se o valor de β igual a 0,18 para a VIS de 18,26 km, profundidade óptica de 0,0857, são valores computados através dos dados de entrada, determinados por meio de planilha

Tabela 1 - Classificação da pluviosidade segundo o IAC.

Índice de Anomalia de Chuva (IAC)	Classificação pluviométrica
> 4	Extremamente Chuvoso (EC)
$2 > e < 4$	Muito Chuvoso (MC)
$0 > e < 2$	Chuvoso (C)
0	Nem Chuvoso Nem Seco
$0 > e < -2$	Seco (S)
$-2 < e > -4$	Muito Seco (MS)
< -4	Extremamente Seco (ES)

eletrônica e cálculos online (http://www.patarnott.com/office/AnalyzeSun_Photometer_UNR.pl), expoente de Ångström de -1,3, pressão atmosférica de 850 mb, comprimento de onda central da banda 3 (561,25 nm), latitude, longitude do ponto central da cena, data e hora da passagem do Landsat-8 (Tabela 2).

O albedo da superfície, conforme alguns estudos, foi obtido de acordo com a Eq. 4 (Bastiaanssen, 2000; Allen et al., 2002; Silva et al., 2016).

$$\alpha_{\text{sup}} = \frac{\alpha_{\text{toa}} - \alpha_{\text{atm}}}{\tau_{\text{sw}}^2} \quad (4)$$

em que α_{sup} é o albedo da superfície; α_{atm} é a refletância da atmosfera, valor de 0,03 (Bastiaanssen, 2000) e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica (Allen et al., 2002).

O NDVI indica o grau de atividade fotossintética da vegetação sadia e a quantidade de vegetação verde, estimado conforme a Eq. 5 (Allen et al., 2002).

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4} \quad (5)$$

em que, ρ_5 e ρ_4 são as respectivas bandas refletivas 5 e 4 do Landsat-8 de sensor OLI.

Tabela 2 - Variáveis meteorológicas da EMA de Petrolina no dia juliano (DJ) e horas da passagem do Landsat-8 são ângulo de elevação solar (E), temperatura do ar (T, °C), umidade relativa (UR, %), Pressão atmosférica (Po, hPa), profundidade óptica (τ) e visibilidade horizontal (VIS, km)

Datas	DJ	E	T	UR	P _o	τ	VIS
14/12/2015	348	60,546	24,4	63	971,8	0,0850	18,37
12/11/2015	316	64,848	26	87	972,1	0,0856	18,26
27/10/2015	300	65,969	26,4	60	974,1	0,0858	18,23
24/08/2015	236	55,172	24,4	63	973,9	0,0857	18,24
22/09/2014	265	62,348	29,5	38	972,3	0,0856	18,26
05/08/2014	217	51,118	24,9	58	976,6	0,0860	18,19
02/06/2014	153	48,879	24,1	62	971,6	0,0855	18,28
05/10/2013	278	65,128	29,9	42	972,4	0,0856	18,26
03/09/2013	246	58,280	23,8	56	974,9	0,0858	18,23
30/05/2013	151	47,699	24,4	59	974,7	0,0858	18,23

O MSDI corresponde ao desvio padrão calculado por meio de um filtro de 3×3 aplicado na banda 4 do Landsat-8, conforme Eq. 6.

$$\text{MSDI} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{DN}_i - \overline{\text{DN}})^2}{N}} \quad (6)$$

em que N = número de pixels do filtro 3×3 , ou seja, N = 9; DN_i = valor do pixe; $-\text{DN}_i$ = valor do número digital médio de cada janela de nove pixels.

Os mapas temáticos de degradação ambiental do Município de Petrolina foram estimados a partir da classificação por AD baseados em regras preestabelecidas. Os conjuntos de regras de indicadores para cada classe de degradação ambiental estão listados na Tabela 3 conforme Xu et al. (2009). A área estudada apresenta grande heterogeneidade, fato este que foi fundamental para definir o grau de degradação em escala regional. As classes degradação inexistente, baixa e degradação severa foram identificadas com precisão usando apenas NDVI e albedo. O MSDI foi usado, principalmente, para distinguir a média e alta degradação.

A intensidade da mudança do uso e ocupação do solo (I) foi calculada a partir dos valores de refletância das bandas 4 e 5 do Landsat-8 no tempo 1 (mês analisado) e tempo 2 (mês posterior ao mês analisado) expresso pela Eq. 7 (Zhan et al., 2000).

$$I = \sqrt{(\Delta\rho_4)^2 + (\Delta\rho_5)^2} \quad (7)$$

3. Resultados e Discussão

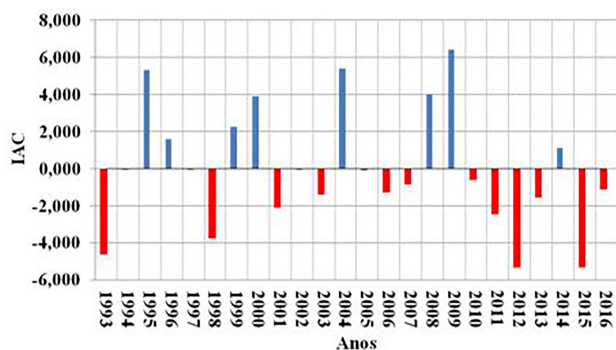
A Fig. 2 apresenta os valores de IAC anual para o posto Petrolina-PE. Nela é possível observar três períodos de dois anos consecutivos de muita chuva entre os anos de 1995 (EC) a 1996 (C); 1999 (C) a 2000 (MC); 2008 (MC) a 2009 (EC) e um período de dois anos consecutivos com poucas chuvas, ou seja, 2006 (S) a 2007 (S). Além disso,

Tabela 3 - Regra para avaliação da degradação, utilizando imagens Landsat-8. Fonte: Adaptado de Xu *et al.* (2009).

Classes de degradação	Índices		
	NDVI	MSDI	Albedo
Inexistente	< 0,25	—	< 0
	< 0,50	—	—
	< 0	—	—
Baixo	< 0,25	—	> 0
Médio	0,32 < e < 0,40	> 3	0,175 < e < 0,19
	0,32 < e < 0,40	< 3	0,175 < e < 0,19
Alto	0,25 < e < 0,32	> 3	0,175 < e < 0,19
	0,25 < e < 0,32	< 3	0,175 < e < 0,19
Severo	< 0,25	—	> 0,22

observam-se um período de quatro e outro de dois anos consecutivos sem chuva, variando entre seco a extremamente seco entre os anos de 2010 a 2013 e 2015 a 2016, respectivamente. Somente o ano de 2014 foi classificado como chuvoso entre 2010 a 2016. Os valores calculados para IAC anual variaram entre -5,291 e +6,440. Alves *et al.* (2016), também em estudo em Petrolina, utilizando dados de 1964 a 2007, encontraram valores de IAC variando entre -5,31 e +7,24, implicando em instabilidade para a produção agrícola de sequeiro.

Na análise visual observa-se tendência para diminuição de IAC para os últimos sete anos, sendo que as ocorrências de anomalias negativas são maiores que as positivas. Essa variabilidade do IAC está relacionada com a influência dos fenômenos Dipolo do Atlântico e eventos anômalos no Oceano Pacífico associados ao El Niño-Oscilação Sul (Oliveira Júnior *et al.*, 2012; Alves *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2017). Esses fenômenos contribuem para o processo de degradação. A superfície afetada pela degradação é caracterizada por escassez de chuvas e intensa evapotranspiração, contribuindo para o desenvolvimento de vegetação esparsa e a ocorrência de grupos de plantas de estruturas simples (Vorovencii, 2015).

**Figura 2** - IAC anual do posto Petrolina, PE, para o período consecutivo de 1993 a 2016.

A Fig. 3 apresenta a evolução temporal e espacial do índice de vegetação NDVI. Observa-se que os mapas temáticos do NDVI nas datas 30/05/2013 (Fig. 3A) e 02/06/2014 (Fig. 3D), em média, apresentaram os maiores valores de cobertura vegetal. Nestas datas não ocorreram precipitações, mas as precipitações acumuladas no período de 28/02/2013 a 29/05/2013; 04/03/2014 e 01/06/2014 (três meses antes das datas da passagem do Landsat-8) somam 90,0 mm e 182,7 mm, respectivamente, contribuindo para maior atividade fotossintética para as áreas de vegetação nativa. As datas de imageamentos estão dentro do período seco (maio a outubro), porém a umidade do solo acumulada antes da passagem do satélite contribuiu para a manutenção dos extratos herbáceos e presença marcante de dossel foliar da vegetação, favorecendo a elevação do NDVI. A distribuição temporal das precipitações pluviométricas tem forte influência no balanço hídrico no bioma Caatinga e, conseqüentemente, na umidade do solo, influenciando diretamente o NDVI (Arraes *et al.*, 2012).

Por outro lado, as baixas precipitações acumuladas três meses antes da passagem satélite nas datas 03/09/2013 (25 mm; Fig. 3B); 05/10/2013 (18,6 mm; Fig. 3C); 22/09/2014 (30 mm; Fig. 3F); 24/08/2015 (5,8 mm; Fig. 3G); 27/10/2015 (2,7 mm; Fig. 3H), 12/11/2015 (12,8mm; Fig. 3I) e 14/12/2015 (13,8 mm; Fig. 3J) também induzem as espécies da Caatinga a liberarem suas folhas por serem decíduas. No entanto, na data 12/11/2015 (Fig. 3I) o NDVI não variou espacialmente, devido ao início do período chuvoso do Município que vai de novembro a abril. No período seco, a maioria das plantas da Caatinga perdem a folhagem, recompondo-se rapidamente, logo que inicia um novo período de chuva (Francisco *et al.*, 2012). Oliveira (2015), usando imagens do Landsat-5 no período seco, classificou e analisou mudanças do uso e cobertura do solo no Município de Floresta-PE, obtendo valores de índices Kappa (Kp) entre 0,8 a 1,0. Isso mostra que o período seco ainda é o mais adequado para trabalhos de classificação e mapeamento da vegetação da Caatinga (Francisco, 2013).

As Figs. 3B (03/09/2013), 3D (02/06/2014) e 3I (12/11/2015) mostram acentuada variabilidade espacial e temporal da cobertura vegetal com valores do NDVI para área irrigada de 0,62, 0,78, 0,57; Caatinga de 0,42, 0,93, 0,44; área de solo exposto de 0,07, 0,098, 0,075; área urbana de 0,014, 0,016 e 0,013, respectivamente. Souza (2014) encontrou os menores valores na classe de solo exposto (0,01), seguido da área urbana (0,02 e 0,03) para o Município de João Pessoa na Paraíba, proporcionalmente à precipitação. Em geral, os valores médios do NDVI variam entre o mínimo de 0,29 para o dia 14/12/2015 (Fig. 3J) e máximo de 0,55 no dia 02/06/2014 (Fig. 3D), corroborando com os encontrados por Ferreira *et al.* (2012) na mesma região do presente estudo, no ano de 2001, com valores médios do NDVI na ordem de 0,28 e 0,36.

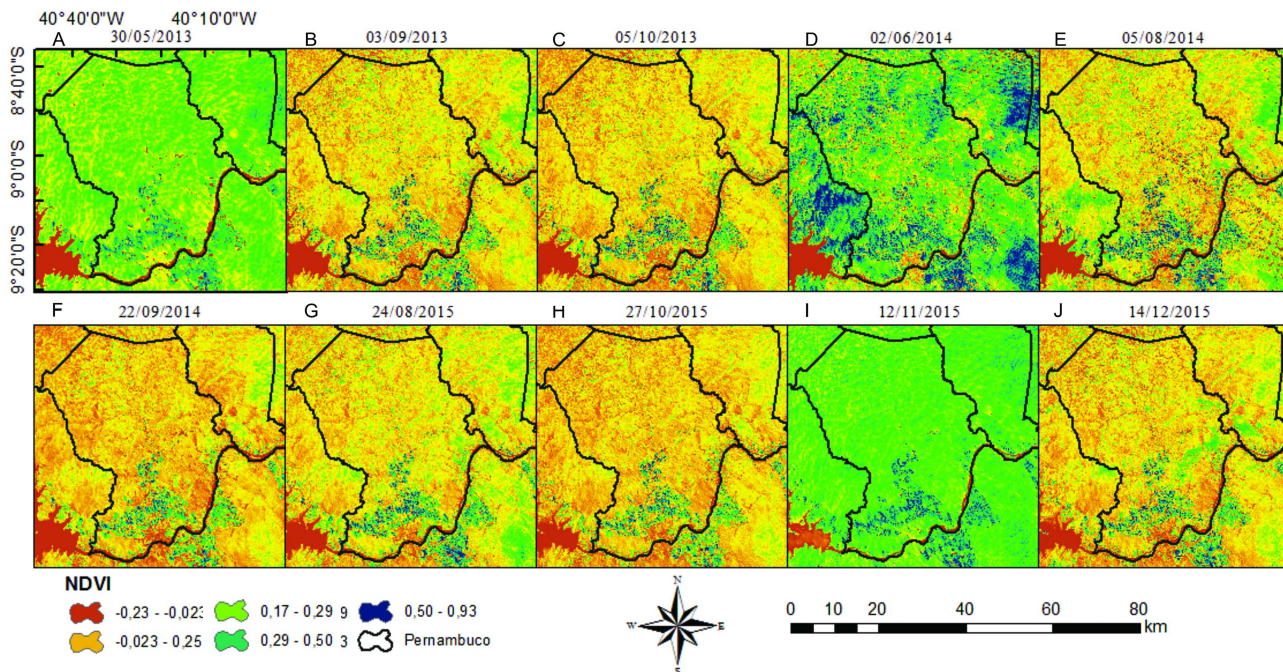


Figura 3 - Evolução temporal e espacial do NDVI no Município de Petrolina-PE.

A Fig. 4 também apresenta a variabilidade espacial e temporal do albedo da superfície (α) diante do uso e ocupação do solo no Município de Petrolina-PE. Nas datas 03/09/2013 (Fig. 4B), 02/06/2014 (Fig. 4D) e 12/11/2015 (Fig. 4I), as áreas de pomares irrigados de banana, manga, goiaba e uva, de formas retangulares, apresentam valores de α próximos de 13%, 9,5% e 18%, respectivamente. Esta variação pode ser explicada pelo próprio desenvolvimento da cultura, conseqüente mudança no ângulo de incidência da luz sobre a superfície da copa da vegetação (Leitão *et al.*, 2002). Silva *et al.* (2005), estudando o α na mesma área de estudo, constataram que as áreas com culturas frutíferas, apresentaram valores praticamente constantes, em torno de 15%. Esses valores são consistentes com o α estimado para cobertura de vegetação alta, derivado do satélite Landsat. Vários autores analisando áreas agrícolas constataram que os valores de α variam entre 13% e 25% (Silva *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2016).

Em áreas com vegetação nativa (Caatinga) os valores médios do α nos anos de 2013 a 2015 são de 27%, 16% e 26%, respectivamente. Com tudo, há uma pequena variação nos anos de 2013 e 2015, apontando para uma baixa ou nenhuma mudança no uso da terra, ou seja, não houve retirada da vegetação destas áreas (Fig. 4). Estes dados corroboram com os mapas do NDVI e degradação por AD. Arraes *et al.* (2012) ao estudarem a dinâmica do balanço de energia sobre o açude Orós no estado do Ceará, constataram este mesmo fato no α e na vegetação da área estudada. Qualquer mudança no uso e ocupação do solo conduz a uma alteração visível no albedo da superfície (Vorovencii, 2015).

Em áreas de solo exposto a variação do α no período de 2013 a 2015 foi de 54%, 53% e 64%, respectivamente. O albedo da superfície no solo exerce um controle na quantidade de energia de onda curta absorvida pela superfície da terra, conseqüentemente, passa a ser um importante modulador do balanço de radiação à superfície (Arraes *et al.*, 2012). A variação do α na zona urbana foi de 55%, 11% e 22%, respectivamente, sendo considerada uma variação com uma amplitude alta entre os anos estudados. Verifica-se, ainda, que a barragem de sobradinho bem como o leito do rio São Francisco apresenta tonalidade azul (Fig. 4) com valor de α de 5%, corroborando aos resultados de Silva *et al.* (2016), computando o albedo da superfície com imagens Landsat-8 OLI no semiárido brasileiro, encontraram valores de albedo para os dias 24 de junho, 12 de setembro e 14 de outubro no ano de 2013. Em seus resultados as áreas com albedo inferior a 9% compreendem aos corpos d'água (represa de São Gonçalo e pequenos lagos, rios e córregos). As áreas urbanas, em geral, apresentam albedo superior a 25%, o que também é observado em áreas de solo com grande exposição. As parcelas de áreas irrigadas no *perímetro irrigado São Gonçalo* mostraram albedo de 16 a 18%; no entanto, em pomares recém-plantados (baixo índice de vegetação), a maior exposição ao solo causou aumento no albedo.

A Tabela 4 mostra as classes de degradação com as suas áreas, acurácias e índices Kappa (K_p). Os resultados da classificação por AD baseados nas regras preestabelecidas são satisfatórios com acurácia (A_r) média de 98,49%, com melhores precisões de 99,96% encontradas

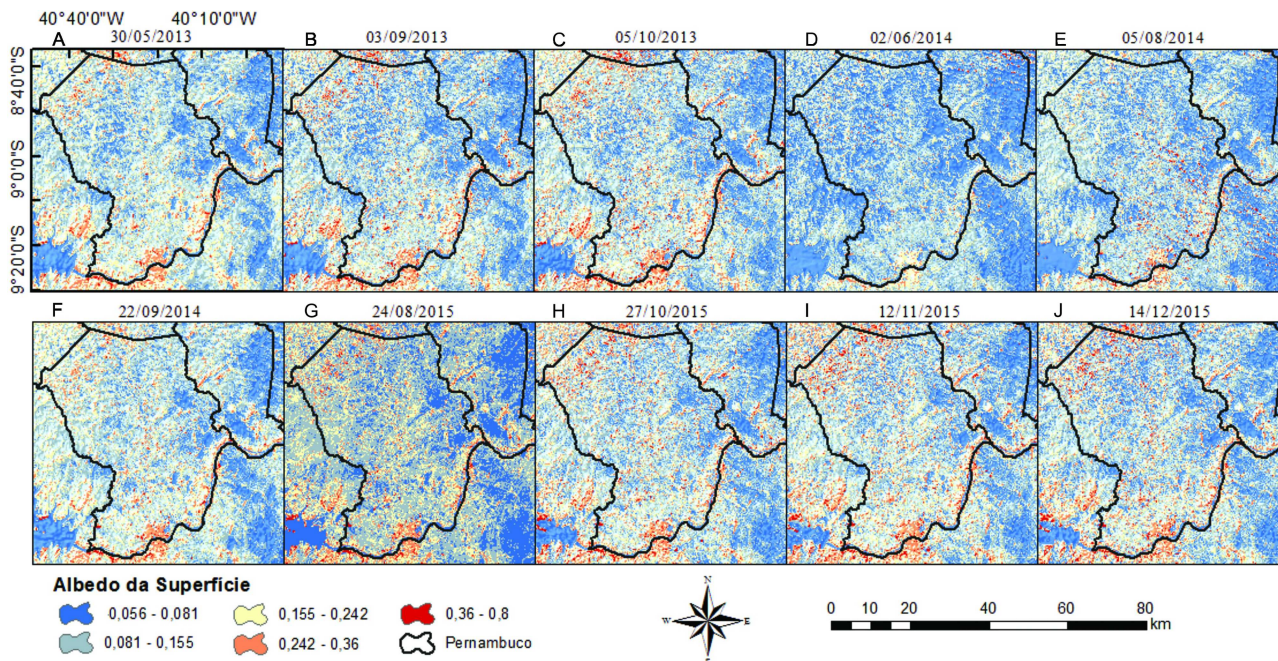


Figura 4 - Evolução temporal e espacial do albedo da superfície em Petrolina-PE.

nas datas de 05/10/2013, 02/06/2014 e 05/08/2014 (período seco).

Para o índice Kp é constatado valor médio de 0,97, o maior valor é de 0,99 nas datas 05/10/2013, 30/05/2013, e para todas as imagens de 2014. O menor Kp observado é de 0,88 na data 24/08/2015. O Kp médio é considerado como excelente para todas as imagens analisadas. As Ar das imagens classificadas variaram entre 97,07% e 99,96%, mostrando que o classificador AD foi bastante eficiente (Tabela 4). Vorovencii (2015) aplicou o AD para classificar áreas degradadas em Dobrogea, Romênia entre 1987-2011 (cinco cenas Landsat-5), encontrando melhor valor médio de acurácia de 90,42% e Kp de 0,88 para 2011 e menor valor médio de Ar de 85,21% e Kp de 0,822 para 1987.

A comparação dos meses de setembro de 2013 e 2014 (Tabela 4) mostra que a área de degradação severa regrediu aproximadamente 116 ha (8,2%). Essa regressão está associada ao regime de chuvas antecedentes as datas dos imageamentos, uma vez que no ano de 2013 as precipitações acumuladas medidas na estação meteorológica automática de Petrolina para 8, 16, 30, 45 e 60 dias foram de 0,0; 2,8; 4,6; 15,6 e 18,2 mm, respectivamente, no entanto, para 2014 as precipitações acumuladas foram de 0,0; 7,2; 7,2; 9,6 e 35,3 mm, respectivamente. Vale ressaltar que 2010-2015, exceto 2014, foram anos muito secos com diferentes condições meteorológicas, contribuindo para aumentar o risco de degradação, provocado pelas modificações das distribuições espacial e temporal de temperatura, precipitação, ventos e insolação ocorrem intensamente durante os períodos de secas severas (Vorovencii, 2015).

Os resultados da avaliação da degradação nos anos de 2013 a 2015 são apresentados na Fig. 5. Constatou-se que a degradação apresenta uma tendência de inversão. Esse fato é observado na análise dos mapas de degradação dos meses de agosto, outubro, novembro e dezembro do ano de 2015 (Figs. 5G, H, I e J), na qual, de outubro a novembro houve aumento da degradação, principalmente para a classe severa. Contudo, quando se analisa os meses de outubro e novembro com o mês de dezembro de 2015 observa-se a reversão da degradação, com diminuição, principalmente, das classes alta e severa e aumento das classes degradação inexistente e baixa. A quantidade de chuva aumentou em 2014, associada ao fenômeno La Niña (Alves *et al.*, 2016). A intensidade da precipitação pode causar erosão da superficial ou profunda e a água da chuva carrega misturas tóxicas de limistone, bauxita, argila, limo, pirita e fosfogídio de formas rudimentares do solo. Estas ações resultam na perda de cobertura vegetal e em terra estéril com aumento da refletância e elevação do albedo (Vorovencii, 2015).

O mapa temático de 02/06/2014 (Fig. 5D) apresenta na maior parte do Município baixa degradação. Esta classe, que abrange os valores baixos de níveis de risco à degradação do solo, tem os setores representativos, ocupando 62,47% de área. Dessas observações, infere-se que na data de imageamento, a área estudada oferece menor risco ao processo de degradação. Este fato deve-se a precipitação bem como a resiliência que são fatores que influenciam na formação e manutenção da Caatinga. Observa-se que a classe com tonalidade em vinho corresponde a classe severa, esta que representa os pixels com os menores valores do NDVI e maiores valores de albedo e

Tabela 4 - Área em hectares (%) das classes da degradação no Município de Petrolina e adjacência nos períodos de 2013, 2014 e 2015. Ar = Acurácia e Kp = Índice Kappa.

Data	Inexistente	Baixo	Médio	Alto	Severo	Ar	Kp
30/05/13	156,1(11,1)	862,7(61,5)	11,6(0,8)	193,0(13,8)	178,0(12,7)	99,76	0,99
03/09/13	123,9(8,8)	800,9(56,8)	15,9(1,1)	220,1(15,6)	249,3(17,7)	99,16	0,98
05/10/13	145,6(8,1)	873,9(48,4)	405(22,4)	347,7(19,2)	33,9(1,9)	99,96	0,99
02/06/14	872,4(62,5)	367,2(26,3)	37,4(2,7)	37,2(2,7)	82,3(5,9)	99,96	0,99
05/08/14	301,9(21,5)	818,0(58,3)	8,6(0,6)	158,8(11,3)	115,3(8,2)	99,96	0,99
22/09/14	158,4(11,3)	876,7(62,4)	9,7(0,7)	227,7(16,2)	132,9(9,5)	99,41	0,99
24/08/15	183,2(13)	885,9(62,9)	10,5(0,7)	185,9(13,2)	143,2(10,2)	92,99	0,88
27/10/15	110,9 (7,9)	804,5(57,5)	21,8(1,6)	203,8(14,6)	257,1(18,4)	97,67	0,96
12/11/15	121,8(7,7)	877,0(55,8)	28,9(1,8)	189,3(12)	355,9(22,6)	97,07	0,95
14/12/15	157,05(11,2)	819,95(58,3)	23,72(1,7)	167,88(11,9)	238,03(16,9)	98,92	0,98

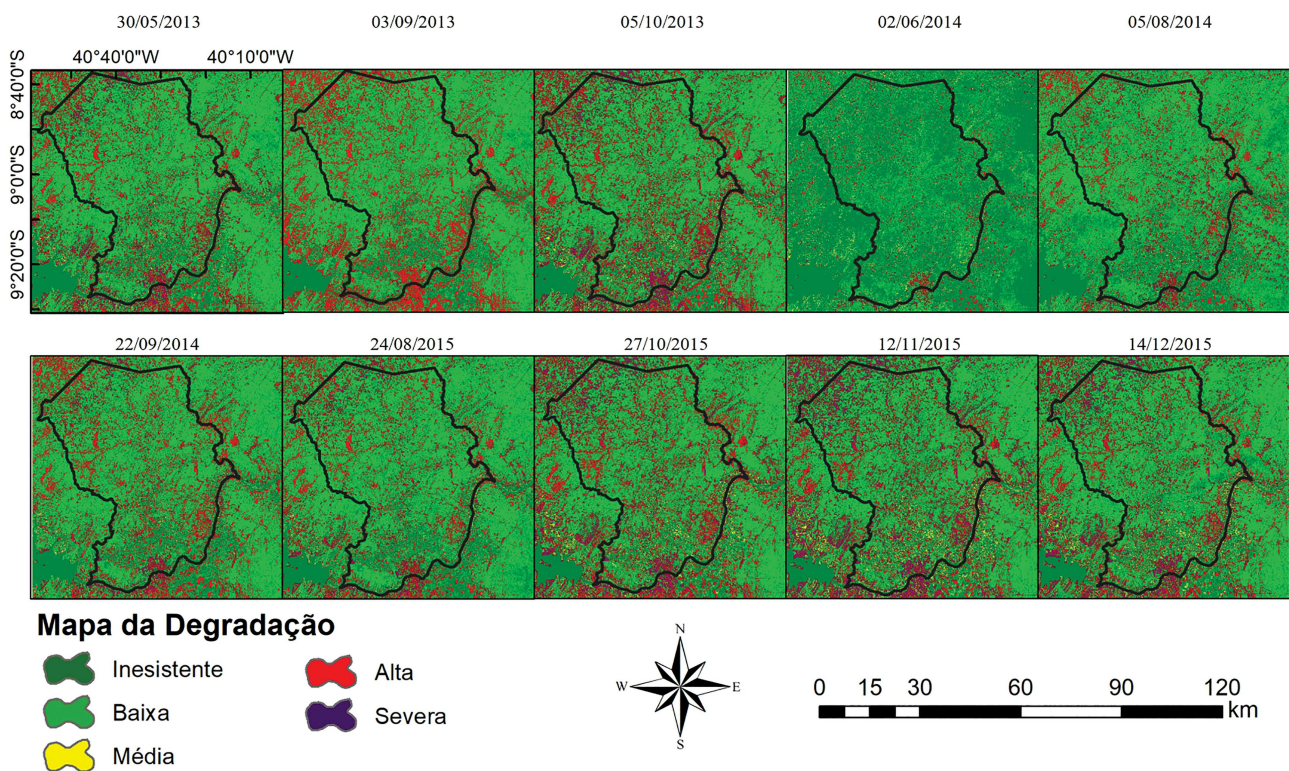


Figura 5 - Evolução temporal e espacial da degradação do Município de Petrolina-PE.

MSDI, a mesma corresponde, principalmente à área urbana, áreas de solo exposto e áreas salinizadas com alta suscetibilidade a desertificação (Fig. 5).

Nota-se que a degradação está mais concentrada nas margens do rio São Francisco e áreas adjacentes, bem como próximo as áreas antropizadas, principalmente, no perímetro irrigado de Petrolina e Juazeiro, devido à pressão da Caatinga e abandono das áreas irrigadas. Pôde-se constatar, ainda, na área de estudo que os mapas temáticos de degradação estão em conformidade com os mapas do NDVI (Fig. 3), na qual, não existe cobertura vegetal nas áreas que se encontram a classe severa,

contribuindo para uma maior susceptibilidade à erosão. Para Vorovencii (2015), a redução de grama natural e de cobertura vegetal sobre superfícies secas afetam a temperatura da superfície e a umidade do ar, influenciando a circulação de massa de ar e a precipitação. Além disso, a secura do solo e a redução de suas camadas favorecem a erosão eólica em locais com solo exposto. Uma das soluções para evitar os problemas com a erosão eólica nas adjacências do rio seria a plantação de quebra-ventos. Seu papel é essencial na proteção de campos agrícolas contra os ventos intensos, insolação e evapotranspiração (Vorovencii, 2015). Especialistas no campo estimam que a

existência de quebra-ventos pode resultar em um aumento de produtividade nas áreas ao seu redor de 20% (Vasilescu, 2008).

Os resultados da avaliação da magnitude da mudança na ocupação e uso do solo dos anos de 2013 a 2015 são apresentados na Fig. 6. Observa-se que o imageamento das cenas do ano de 2013 (Fig. 6A, B e C), em comparação aos demais anos, apresenta maiores áreas classificadas como mudança severa (tonalidade vermelha), indicativo de que no ano de 2013 há grandes mudanças principalmente nas áreas de Caatinga, impulsionada pelos baixos índices pluviométricos e pela ação antrópica como abandono de áreas irrigadas por conta da salinização do solo muito comum nestas áreas. Pode-se observar que entre o mês anterior “setembro/2013” e o mês posterior “outubro/2013” a precipitação pluviométrica é de apenas 4,6 mm, valor considerado baixo para dois meses.

Zhan *et al.* (2000) também relacionaram a precipitação como o principal fator na presença das classes de mudanças mais severas nas áreas estudadas. Comparando os resultados, nas Figs. 6D, E e F, é possível notar que há uma grande similaridade entre estas imagens obtidas no ano de 2014. Este comportamento é explicado, em parte, pelo fato de que o ano de 2014 foi classificado como chuvoso quando comparado a 2013 e 2015, anos extremamente secos, uma vez que a Caatinga apresenta um grande poder de resiliência. Sua resposta à precipitação ocorre de forma rápida, com isto, no período entre as cenas comparadas do mês anterior “junho/2014” e posterior “agosto/2014” choveu 30 mm, sendo suficiente para ocorrer à regeneração da Caatinga no Município de Petrolina. Na Caatinga, a

recomposição da vegetação se dá de forma rápida com a chegada das primeiras chuvas (Maldonado, 2005).

As mudanças ocorridas entre 2013 e 2015 observadas nas imagens de detecção, geradas a partir das imagens NDVI são apresentadas na Fig. 7. A imagem de detecção permite ressaltar as áreas com redução da cobertura da Caatinga em decorrência da mudança no uso da terra nos anos analisados. Os corpos hídricos são classificados em sua grande maioria como mudança severa. Observa-se que o algoritmo da técnica de detecção de mudanças é mais sensível aos corpos hídricos do que o algoritmo da técnica de magnitude da mudança, uma vez que nos mapas de detecção de mudanças os corpos hídricos de quase todos os meses analisados são classificados como mudança severa (Fig. 7). Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Ribeiro *et al.* (2014) que estimaram e detectaram mudanças na vegetação de Caatinga através de geotecnologias no Município de Sumé-PB.

Nas imagens classificadas do ano de 2014 (Figs. 7C, D e E) é possível visualizar que quando comparado os meses de junho, agosto e setembro houve pouca mudança sendo que a classe não houve mudança (tonalidade branca) destaca-se entre as demais classes. A cobertura vegetal no mês de junho de 2014, em comparação com o mês de setembro de 2014, não apresenta diferença entre esses meses o suficiente para modificar completamente toda a paisagem.

4. Conclusões

As imagens do sensor OLI/Landsat-8 e a classificação da cobertura da terra pelo algoritmo AD baseado no

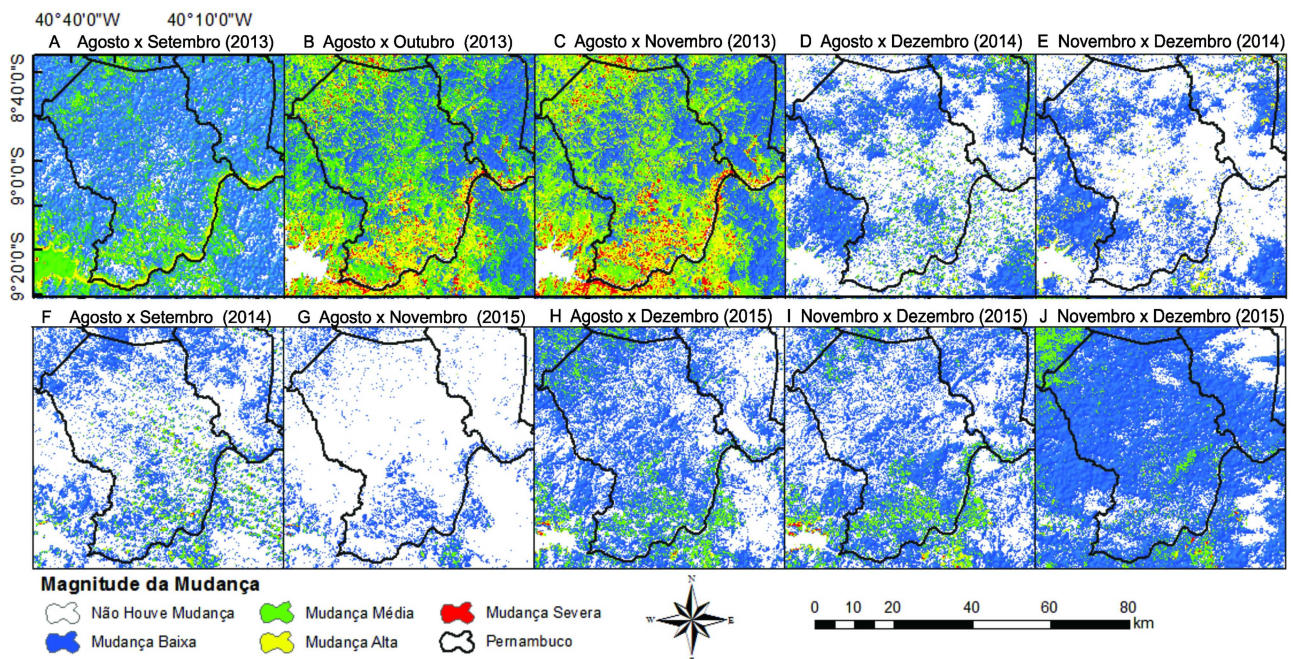


Figura 6 - Evolução temporal e espacial da magnitude da mudança do Município de Petrolina-PE.

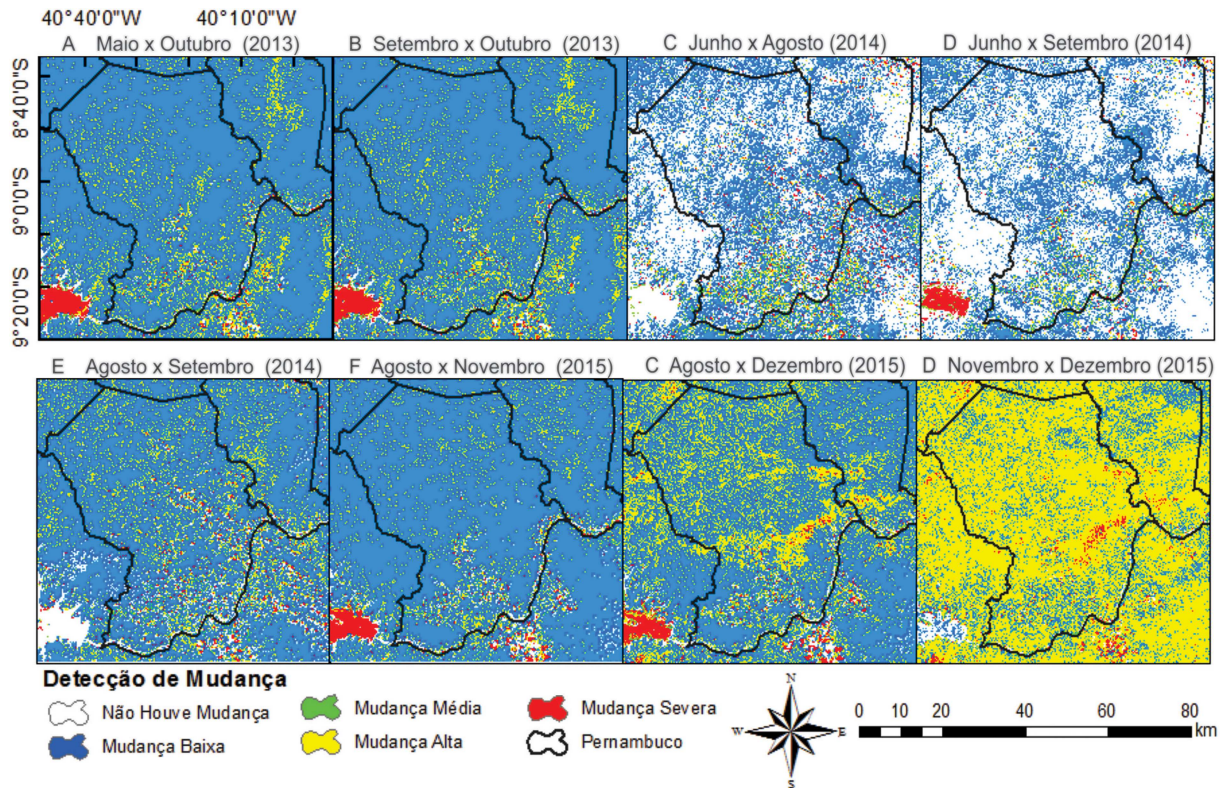


Figura 7 - Mapa temático da detecção de mudança do Município de Petrolina-PE.

NDVI, albedo e MSDI, como indicadores das condições de cobertura vegetal, micrometeorologia e heterogeneidade da superfície, possibilitaram a identificação das diferentes coberturas com um índice Kappa acima de 90% no período estudado.

O monitoramento espaço-temporal apresentou alterações do uso e ocupação do solo identificadas com o aumento do albedo e diminuição do índice de vegetação NDVI.

O método de magnitude mostrou-se ser menos eficiente no monitoramento da degradação ambiental e das alterações na cobertura vegetal, durante a análise espaço-temporal.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos revisores da RBMET pelas correções e sugestões; Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola; Universidade Federal Rural de Pernambuco; A CAPES e CNPq pela concessão das bolsas de Mestrado e Doutorado. Também ao INMET pelo fornecimento dos dados meteorológicos de superfície.

Referências

ALLEN, R.G.; TREZZA, R.; TASUMI M. Surface energy balance algorithms for land. **Advance training and Users Manual, Idaho Implementation**, v. 1.0, p. 98, 2002.

Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

Índice de anomalia de chuva para diferentes mesorregiões do Estado de Pernambuco. **Revista Pensar Acadêmico**, v. 14, n. 1, p. 37-47, 2016.

ARRAES, F.D.D.; ANDRADE, E.M.; SILVA, B.B. Dinâmica do balanço de energia sobre o açude Orós e suas adjacências. **Revista Caatinga**, v. 25, n. 1, p. 119-127, 2012.

BASTIAANSEN, W.G.M. SEBAL—based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87-100, 2000.

BUSTAMANTE, M.M.; NOBRE, C.A.; SMERALDI, R.; AGUIAR, A.P.; BARIONI, L.G.; FERREIRA, L.G.; LONGO, K.; MAY, P.; PINTO, A.S.; OMETTO, J.P et al. Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. **Climatic Change**, v. 115, n. 3-4, p. 559-577, 2012.

CATEN, A.T.; SAFANELLI, J.L.; RUIZ, L.F.C. Mapeamento multitemporal da cobertura de terra, por meio de árvore de decisão, na bacia hidrográfica. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 6, p. 1198-1209, 2015.

DESCHAMPS, P.Y.; HERMAN, M.; TANRÉ, D. Influence de l'atmosphère en télédétection des ressources terrestres: modélisation et possibilités de correction. In: **Colloque de la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection**, p. 543-558, 1981.

FELDE, G.W.; ANDERSON, G.P.; COOLEY, T.W.; MATTHEW, M.W.; ADLER, G.S.M.; et al. Analysis of Hyperion data with the FLAASH atmospheric correction algorithm. **IGARSS 2003 - 2003 IEEE International**

- Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477)**, v. 1, p. 90-92, 2003.
- FERREIRA, J.M.S.; FERREIRA, H.S.; SILVA, H.A.; SANTOS, A.M.; GALVÍNIO, J.D. Análise espaço-temporal da dinâmica da vegetação de Caatinga no Município de Petrolina – PE, **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 4, p. 904-922, 2012.
- FRANCISCO, P.R.M. **Modelo de mapeamento da deterioração do Bioma Caatinga da bacia hidrográfica do Rio Taperoá**, PB. 2013. 97 f. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013
- FRANCISCO, P.R.M.; CHAVES, I.B.; LIMA, V.E.R.; BANDEIRA, M.M.; SILVA, B.B. Mapeamento da Caatinga com uso de geotecnologia e análise da umidade antecedente em bacia hidrográfica, **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 3, p. 676-693, 2012.
- FREITAS, M.A.S. Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semi-áridas. **Revista Tecnologia**, v. 19, n. 1, p. 84-95, 1998.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 92 p.
- LEITÃO, M.M.V.B.R.; SANTOS, J.M.; OLIVEIRA, G.M. Estimativas do albedo em três ecossistemas da floresta amazônica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 256-261, 2002.
- MALDONADO, F.D. **Desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de detecção de mudanças na cobertura vegetal do semiárido**. 2005. 311 f. Tese de Doutorado em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.
- OLIVEIRA JÚNIOR, J.F.; LYRA, G.B.; GÓIS, G.; BRITO, T.T.; MOURA, N.S.H. Análise de homogeneidade de séries pluviométricas para determinação do Índice de Seca IPP no Estado de Alagoas. **Revista Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 1, p. 101-112, 2012.
- OLIVEIRA, C.P. **Modelagem dinâmica da cobertura florestal do Município de Floresta – PE**. 2015. 68 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2015.
- OTTINGER, M.; KUENZER, C.; LIU, G.; WANG, S.; DECH, S. Monitoring land cover dynamics in the Yellow River Delta from 1995 to 2010 based on Landsat 5 TM. **Applied Geography**, v. 44, p. 53-68, 2013.
- PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2010. 127 p.
- RIBEIRO, G.N.; FRANCISCO, P.R.M.; MORAES, J.M. Detecção de mudança de vegetação de Caatinga através de geotecnologias. **Revista Verde**, v. 9, n. 5, p. 84-94, 2014.
- RUIZ, L.F.C.; TEM, C.A.; DALMOLIN, R.S.D. Árvore de decisão e a densidade mínima de amostras no mapeamento da cobertura da terra. **Revista Ciência Rural**, v. 44, n. 6, p. 1001-1007, 2014.
- SILVA, A.R.; SANTOS, T.S.; QUEIROZ, D.E.; GUSMÃO, M.O.; SILVA, T.G.F. Variações no índice de anomalia de chuva no semiárido. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2 n. 4, p.377-384, 2017.
- SILVA, B.B.; BRAGA, A.C.; BRAGA, C.C. Balanço de radiação no perímetro irrigado São Gonçalo - PB mediante imagens orbitais. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 3, p. 145-152, 2011.
- SILVA, B.B.; BRAGA, A.C.; BRAGA, C.C.; OLIVEIRA, L.M.M.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; *et al.* Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 3-8, 2016.
- SILVA, B.B.; LOPES, G.M.; AZEVEDO, P.V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 2, p. 201-211, 2005.
- SOUZA, J.F. **Análise das mudanças do uso e ocupação do solo, variabilidade da temperatura e do saldo de radiação em João Pessoa – PB**. 2014. 130 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.
- VAN ROOY, M.P. A rainfall anomaly index independent of time and space. **Notes**, v. 14, n. 43, p. 43-48, 1965.
- VASILESCU, M.M. Influence of a few Forest shelterbelts on wheat yield. **Forests Magazine**, v. 1, p. 25-33, 2008.
- VOROVENCII, I. Assessing and Monitoring the risk of Desertification in Dobrogea, Romania, using Landsat data and Decision Tree Classifier, **Journal of Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, n. 4, p. 154-220, 2015.
- XU, D.; KANG, X.; QIU, D.; ZHUANG, D.; PAN, J. Quantitative Assessment of Desertification Using Landsat Data on a Regional Scale: A Case Study in the Ordos Plateau, China. **Sensors**, v. 9, n. 3, p. 1738-1753, 2009.
- ZHAN, X.; DEFRIES, R.; TOWNSHEND, J.R.G.; DIMICELI, C.; HANSEN, M.; *et al.* The 250 m global land cover change product from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer of NASA's Earth Observing System. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 6-7, p. 1433-1460, 2000.