Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Análise Espaço-Temporal da Dinâmica da Vegetação de Caatinga no Município de Petrolina - PE

Johnny Mayron Santana Ferreira¹, Henrique dos Santos Ferreira², Hewerton Alves da Silva³, Antonio Marcos dos Santos⁴, Josiclêda Domiciano Galvêncio⁵

¹Graduando em Geografia Licenciatura, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, E-mail: johnnymayron@hotmail.com; ²Graduando em Geografia Licenciatura, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, E-mail: henriquehsf86@hotmail.com; ³Mestre em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, E-mail: he.was.ufpe@hotmail.com; ⁴Doutorando em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, E-mail: geo_fisica@yahoo.com.br; ⁵Professora adjunta do departamento de Ciências Geográficas da Universidade Federal de Pernambuco – DCG/UFPE.

Artigo recebido em 09/10/2012 e aceito em 19/10/2012

RESUMO

O uso de imagens de sensoriamento remoto tem sido amplamente utilizado por pesquisadores a fim de obter melhores resultados sobre as dinâmicas da vegetação. Neste trabalho buscou-se utilizar os índices de vegetação NDVI e NDWI, a Temperatura da Superfície e dados climatológicos com a finalidade da obtenção das dinâmicas da vegetação no município de Petrolina – PE, através da análise de seis imagens, sendo três referentes ao período seco e três ao período chuvoso. Ao realizar as análises dos índices de vegetação puderam-se obter resultados melhores do período chuvoso para o NDWI e do período seco para o NDVI. Já na correlação entre os índices e a Temperatura da Superfície pôde-se observar nos resultados que as temperaturas mais elevadas nos períodos secos eram as mesmas com valores menores de NDVI, e vice-versa. No que diz respeito aos períodos chuvosos pôde-se observar menores temperaturas nos locais onde havia maiores valores para ambos os índices de vegetação (NDVI e NDWI).

Palavras-chave: imagens orbitais; variabilidade climática e caatinga

Analysis Space-Time from Dynamics of Caatinga Vegetation in the Municipality of Petrolina – PE

ABSTRACT

The use of remote sensing images has been widely used by researchers in order to obtain better results on the vegetation dynamics. In this study we sought to use the NDVI and NDWI, surface temperature and climatological data for the purpose of obtaining of vegetation dynamics in the town of Petrolina - PE, through the analysis of six images, three for the dry season and three the rainy season. When performing the analyzes of vegetation indices could be obtained better results for the rainy season NDWI and NDVI for the dry period. In the correlation between the indexes and surface temperature could be observed in the results that the higher temperatures in dry periods were the same with lower NDVI, and vice versa. In the case of rainy periods could be observed at lower temperatures at points of highest values for both indexes of vegetation.

Keywords: orbital images; climatic variability and caatinga.

1. Introdução

Entender a dinâmica dos diversos sistemas ambientais tem sido esforço de vários pesquisadores, buscando maior

conhecimento dos impactos causados a eles em decorrência das variabilidades climáticas e ações antrópicas, no entanto, as complexas inter-relações dos sistemas ambientais tem estreita relação com o meio socioeconômico exigindo um maior conhecimento das trocas

*E-mail para correspondência: johnnymayron@hotmail.com (Ferreira, J. M. S. F.).

de matérias e energias entre si (Christofoletti, 1999; Santos, Galvêncio & Moura, 2010).

A região nordeste do Brasil apresenta alta variabilidade espacial e temporal da precipitação, pois, possui diferentes sistemas atmosféricos de grande escala influenciando na variabilidade de chuvas, tais como: El Nino de oscilação sul (ENOS), vórtices ciclônicos da alta atmosfera (VCAT), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs). Dentre estes os que atuam com maior frequência no semiárido são a ZCIT e VCAT segundo afirmação de Barbosa e Correia (2005).

As variabilidades espaciais e temporais das precipitações associadas à ZCIT possuem relação com o deslocamento norte-sul ao longo do ano. A marcha anual da ZCIT tem, aproximadamente, o período de um ano, alcançando sua posição mais ao norte (8°N) durante o verão do Hemisfério Norte, e a sua posição mais ao sul (1°N) durante o mês de abril (Hastenrath e Heller, 1977 e Citeau et al, 1988a e 1988b). Além dessa oscilação anual, a ZCIT apresenta oscilações com maiores frequências, com o período variando de semanas a dias. Segundo Barbosa e Correia (2005) vários estudos enfatizam a relação entre a intensidade e durabilidade da estação chuvosa e a posição da ZCIT. Ainda segundo os autores, pesquisas mostram que a natureza, distribuição e organização da precipitação na região semiárida do nordeste dependem do período e do sistema de

circulação atmosférica atuante.

Lacerda et al (2010) expõe que os maiores valores de precipitação acontecem no período que vai de fevereiro a abril, já os valores mínimos (ou nulos) ocorrem entre os meses de junho a setembro. As variações dos diferentes agentes climáticos desencadeiam características peculiares ocorrentes no sertão do nordeste (Lacerda et al, 2010; Marengo et al, 2011). Segundo Moura, Melo e Schlindwein (2007) a vegetação de caatinga é adaptada às secas prolongadas e apresenta características anatômicas e fisiológicas que diminuem a perda de água, pois, suculência e o desenvolvimento de órgãos subterrâneos para o armazenamento de água são exemplos de adaptações dessa vegetação ao déficit hídrico.

A fim de obter dados sobre as diferentes condições biofísicas deste tipo de vegetação, diversos autores têm aplicado índices de vegetação para avaliar suas condições biofísicas através de imagens de sensoriamento remoto (Barbosa, 1999; Holanda e Guerra, 2010; Oliveira et al, 2010; Ferreira et al, 2011).

Dentre os índices mais utilizados para a detecção das características biofísicas da vegetação destacam-se o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), proposto por Rouse et al. (1974), o Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), proposto por Huete (1988), e, mais recentemente, o Normalized Difference Water Index (NDWI), apresentado por Gao (1996), sendo o primeiro

sensível a clorofila da vegetação (Júnior, Hermuche e Guimarães, 2006), o segundo é semelhante ao primeiro, porém com amenização dos efeitos de background do solo (Huete, 1988), e o terceiro para medir a quantidade de água líquida presente na vegetação (Gao, 1996).

O objetivo deste estudo foi realizar uma análise espaço-temporal da dinâmica da vegetação de caatinga a partir de índices multiespectrais (NDVI e NDWI), temperatura de superfície e da climatologia local.

2. Material e Métodos

2.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado no município de Petrolina (Figura 1), localizado no nordeste do Brasil, inserido na região do semiárido pernambucano, na mesorregião do Sertão do São Francisco. Sua sede se encontra nas coordenadas geográficas de 09°23'35"S e 40°30'27"W. O município ocupa uma área de, aproximadamente, 4756,0 Km² cerca de, 4,8% da área do estado de Pernambuco.

Figura 1. Localização do Município de Petrolina PE. Fonte: FERREIRA et al 2011.

O município de Petrolina está inserido na depressão sertaneja, unidade geoambiental marcada por um relevo suave-ondulado, paisagem típica do semiárido pernambucano. O clima da região é, segundo a classificação de Köppen, BswH – quente e seco, com a estação chuvosa compreendida entre verão e o outono. A área é caracterizada por baixos

índices pluviométricos e má distribuição das chuvas durante o período das mesmas e, a precipitação média é de 431,8 mm/ano. A vegetação predominante na área é do tipo caatinga arbustivo-arbórea, hiperxerófila, com trechos de floresta caducifolia.

O município de Petrolina está inserido na depressão sertaneja, unidade geoambiental

marcada por um relevo suave-ondulado, paisagem típica do semiárido pernambucano. O clima da região é, segundo a classificação de Köppen, Bswb – quente e seco, com a estação chuvosa compreendida entre verão e o outono. A área é caracterizada por baixos índices pluviométricos e má distribuição das chuvas durante o período das mesmas e, a precipitação média é de 431,8 mm/ano. A vegetação predominante na área é do tipo caatinga arbustivo-arbórea, hiperxerófila, com trechos de floresta caducifólia.

2.2 Dados pluviométricos e de temperatura

Neste trabalho foram utilizados dados pluviométricos e de temperatura do ar obtidos na estação pluviométrica de Petrolina – PE do Instituto de Tecnologia de Pernambuco/Laboratório de Meteorologia de Pernambuco (ITEP/LAMEPE). Destes dados foram construídos climogramas e pluviogramas.

2.3 Processamento das imagens

Foram utilizadas ao todo seis imagens do satélite Landsat 5 obtidas a partir do sensor Thematic Mapper (TM), cujo órbita e ponto são 217/66 e 67, datadas de 12/12/1991, 24/08/1992, 09/08/1998, 04/12/2000, 24/09/2009 e 27/11/2009. As imagens foram adquiridas no catálogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) junto à Divisão de Geração de Imagens (DGI), e são composta por 7 bandas, onde as bandas 1,2,3,4,5 e 7 possuem resolução espacial de 30 metros, e a banda 6

resolução de 120 metros, esta última, de acordo com Markham e Backer (1987), representa a radiação emitida por cada pixel, sendo assim utilizada para o computo da temperatura da superfície. Ambas as cenas seguiram os processos de empilhamento das bandas, correção geométrica e ortorretificação – baseando-se na imagem registrada adquirida no site do Sistema Compartilhado de Informações Ambientais/Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (SISCOM/IBAMA) – e recorte da área do município de estudo, no software ERDAS 9.1 disponibilizado pelo Grupo de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento (SERGEO) da UFPE. Em seguida foram processadas conforme especificados nos tópicos seguintes, e por último criado layout apresentado nas Figuras 1, 4, 7 e 8, através do software ArcGis 9.3, também, disponibilizado pelo SERGEO.

2.3.1 Calibração radiométrica

A calibração radiométrica (Equação 1) consiste na conversão do número digital (ND) de cada pixel e banda em radiação espectral monocromática, essas radiâncias representam a radiação solar refletida por cada pixel da imagem, permitindo obter o saldo de radiação à superfície (R_n), primeira componente do Balanço de Energia a ser obtida. A radiância de cada pixel e banda foi obtida pela equação proposta por (Markham e Baker, 1987):

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} ND \quad (1)$$

Em que: a e b são as radiâncias

espectrais mínima e máxima ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$) ND é a intensidade do pixel (valor inteiro entre 0 e 255) e i corresponde às bandas (1, 2, ... e 7) dos satélites Landsat 5.

2.3.2 Reflectância

A reflectância (Equação 2) de cada banda (L_{λ_i}) é definida como sendo a razão entre o fluxo de radiação solar refletido pela superfície e o fluxo de radiação solar global incidente, que é obtida através da equação (ALLEN *et al.*, 2002):

$$\rho_{\lambda_i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda_i}}{k_{\lambda_i} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (2)$$

Em que: L_{λ_i} é a radiância espectral de cada banda, k_{λ_i} é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$), Z é o ângulo zenital solar e d_r é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol (r_0) e a distância Terra-Sol (r) em dado dia do ano (DSA).

2.3.3 Aplicação do NDVI

Jensen (2009) afirma que o NDVI é importante porque, a partir de sua aplicação, podem ser observadas as variações sazonais e interanuais da vegetação, contribuindo para o seu monitoramento, além de reduzir os ruídos multiplicativos (diferenças de iluminação solar, sombras de nuvens, algumas atenuações atmosféricas e algumas variações topográficas).

Jensen (2009) afirma que a desvantagem do NDVI é a não linearidade, por ser um índice de razão, motivo pelo qual

pode apresentar uma maior influência dos efeitos ruidosos aditivos, tais como radiância de trajetória atmosférica. Para gerar o NDVI (Equação 3) foi utilizado o método proposto por Rouse *et al.* (1973).

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (3)$$

Em que: ρ_{IV} e ρ_V correspondem, respectivamente, às bandas 4 e 3 do Landsat 5 – TM, a banda 4 (infravermelho próximo) apresenta medidas de comprimentos de onda na ordem de: 0,76 – 0,79 μm e a banda 3 (vermelho) possui comprimentos de onda de: 0,63 – 0,69 μm .

O NDVI apresenta uma variação entre -1 a +1. Em superfícies com vegetação verde, os valores variam entre 0 e 1, já para a água e nuvens os valores geralmente são menores que zero.

2.3.4 Aplicação do NDWI

Oliveira *et al.* (2010) destaca que o NDWI é de fundamental importância na compreensão dos processos de queima de biomassa, onde os valores negativos representam áreas com vegetação seca e os valores positivos apresentam vegetação verde.

Este índice é importante nos estudos referentes ao vigor da vegetação, mudanças na biomassa e estresse hídrico das plantas (Cardoso *et al.*, 2009; Jensen, 2009). O NDWI é obtido pela relação entre duas bandas no espectro infravermelho, equivalentes às bandas 4 e 5 do satélite Landsat 5, correspondentes às bandas do infravermelho próximo com comprimentos de onda entre

0,76 – 0,79 μm , e infravermelho médio com medida entre 1,55 – 1,75 μm . Para o cálculo do NDWI utilizou-se o método proposto por Gao (1996), através da Equação 4 descrita a seguir:

$$NDWI = \frac{P_{iv} - P_{mir}}{P_{iv} + P_{mir}} \quad (4)$$

Em que: P_{mir} corresponde a banda 4 do satélite Landsat – 5 (vermelho).

2.3.5 SAVI

Para o cálculo do SAVI (Equação 5), o qual é um índice que visa amenizar os efeitos do “background” do solo, é utilizada a expressão proposta por Huete (1988) (Equação 5).

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (5)$$

Em que: L é uma constante que depende do tipo de solo e o valor mais utilizado é 0,5.

2.3.6 IAF

O Índice de Área Foliar (IAF) foi obtido a partir da Equação 6, sendo definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação pela unidade de área utilizada por essa vegetação. O IAF é um indicador de biomassa de cada pixel da imagem, sendo desenvolvido por Allen et al. (2002).

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (6)$$

2.3.7 Emissividade

Para a obtenção da temperatura da superfície (Equações 7 e 8) foi utilizada a

equação de Planck invertida, válida para um corpo negro. Como cada pixel não emite radiação eletromagnética como um corpo negro, há a necessidade de introduzir a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal ϵ_{NB} , qual seja: 10,4 – 12,5 μm . Por sua vez, quando do cômputo da radiação de onda longa emitida por cada pixel, há de ser considerada a emissividade no domínio da banda larga ϵ_0 (5 – 100 μm). Segundo Allen et al. (2002), as emissividades ϵ_{NB} e ϵ_0 podem ser obtidas para $NDVI > 0$ e $IAF < 3$, segundo:

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331IAF \quad (7)$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01IAF \quad (8)$$

Nos pixels da área de estudo correspondentes a corpos de água ($SAVI < 0$ e, portanto, $IAF = 0$) $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$ (Allen et al., 2002). Para pixels com $IAF \geq 3$, $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$. Para corpos de água ($NDVI < 0$), no caso do lago de Sobradinho e do leito do Rio São Francisco, Silva e Cândido (2004) utilizaram os valores de $\epsilon_{NB} = 0,99$ e $\epsilon_0 = 0,985$, conforme Allen et. al. (2002).

2.3.8 Temperatura da superfície

Para a obtenção da temperatura da superfície (T_s) (Equação 9) são utilizadas a radiância espectral da banda termal $L_{\lambda 6}$ e a emissividade ϵ_{NB} obtida na etapa anterior, como apresentado pela Equação 9.

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB}K_1}{L_{\lambda 6}} + 1\right)} \quad (9)$$

Em que: $K_1 = 607,76 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$
e $K_2 = 1260,56 \text{ K}$ representam as constantes de calibração da banda termal do Landsat 5 – TM (Allen et al., 2002; Silva et al., 2005).

3. Resultados e Discussão

3.1 Variação temporal da precipitação

A variação sazonal da precipitação no município de Petrolina é caracterizada por

uma estação chuvosa, que compreende os meses de novembro a abril, e por uma estação seca, a qual tem sua ocorrência entre os meses de maio e outubro. (Ferreira et al, 2010) Na (Figura 2) são apresentados os climogramas dos anos de 1991, 1992, 1998, 2000 e 2009 que demonstram o comportamento temporal da precipitação e temperatura no município.

Figura 2. Climograma dos anos de estudo abordados neste trabalho

De acordo com o climograma do ano de 1991 (Figura 2), o período chuvoso apresentou precipitações mensais que ultrapassaram os 50mm nos meses de novembro, janeiro, fevereiro e março, com janeiro e março registrando os valores mais elevados 97mm e 171mm, respectivamente.

As temperaturas durante o período chuvoso variaram entre 26 e 27°C, os meses de dezembro e abril apresentaram precipitação abaixo de 30mm e temperaturas médias de 26°C (abril) e 28°C (dezembro). Observa-se que os menores valores de temperaturas ocorreram nos meses de julho e agosto,

justamente nos meses de inverno, 23°C (período seco) e a temperatura mais elevada em dezembro, 28°C.

O climograma do ano de 1992 (Figura 2) representa de maneira clara a divisão do período seco e chuvoso para o município, com valores de precipitação superiores a 63mm mensais e temperaturas entre 25°C e 27°C para o período chuvoso, que compreende os meses de novembro a abril, onde os maiores valores de precipitação foram registrados nos meses de janeiro e fevereiro, com 249mm e 175mm, corroborando, assim, com Ferreira et al, (2010) que apontam para os baixos índices pluviométricos e má distribuição das chuvas durante o período na região. O período seco, apresentou precipitações mensais inferiores a 6mm e temperaturas entre 24°C e 27°C. Os valores mensais mais baixos de temperaturas foram registrados nos meses de junho e julho, 24°C, os mais altos em outubro e novembro, 27°C.

O ano de 1998 apresentou o período de estiagem (seco) mais prolongado em relação aos outros anos analisados nesta pesquisa, com precipitação abaixo dos 8mm entre os meses de abril e outubro e temperaturas variando de 25°C a 29°C. Novembro, dezembro, janeiro, e fevereiro apresentaram precipitação mensal maiores que 60mm, tendo a ocorrência dos meses mais chuvosos em dezembro e janeiro com 74mm e 154mm. A temperatura mensal do período chuvoso variou entre 27°C a 29°C. As temperaturas mais baixas foram

registradas em junho, julho e agosto, 25°C, enquanto as mais altas nos meses de março, abril e novembro, 29°C.

Entre os anos observados, 2000 apresentou o terceiro maior índice pluviométrico com um total anual de 642,2mm. O período chuvoso apresentou totais pluviométricos mensal superior a 60mm, os meses de novembro e dezembro tiveram as maiores precipitações com 154mm e 130mm, as temperaturas mensais para o período variaram entre 25°C e 26°C, o mês de maio que marca o início do período seco, registrou 22mm e junho 15mm, de julho a outubro os valores de precipitação estiveram abaixo dos 4mm e temperaturas oscilando entre 23°C e 27°C. As temperaturas mensais mais baixas ocorreram nos meses de junho e julho registrando 24°C e 23°C respectivamente, e a mais alta no mês de outubro 27°C.

O ano de 2009 registrou o maior total de chuvas em comparação aos anos de 1991, 1992, 1998 e 2000, tendo nos meses de fevereiro, março e abril chuvas superior a 120 mm e maior total pluviométrico no mês de abril – 224mm. As temperaturas durante o período chuvoso se mantiveram entre 26°C e 27°C. Para o período seco deste ano, com exceção dos meses de maio e outubro que apresentaram precipitação mensal de 85 mm e 106 mm respectivamente, a precipitação mensal esteve abaixo dos 16mm, registrando temperaturas entre 24°C e 27°C. As temperaturas mensais mais amenas foram

verificadas nos meses de maio, junho e julho, 24°C e a mais elevada no mês de janeiro com 28°C.

Confrontando-se os dados apresentados nos climogramas da (Figura 2), percebe-se a variação da distribuição da precipitação nos anos observados, com ocorrência das chuvas entre os meses de novembro a abril e concentração entre os meses de janeiro e abril com um período seco apresentando baixos índices pluviométricos de maio a outubro. Contudo há uma variação em relação aos meses mais e menos chuvosos e diferenças relevantes quanto ao total anual precipitado, como exemplo podem ser comparados os totais anuais do ano de menor precipitação – 1998 com total anual de 394,9 mm e o mais chuvoso - 808,4 mm (2009).

Lacerda et al (2010) afirma que a variabilidade espacial e temporal das

precipitações pluviométricas constitui uma característica marcante no clima do nordeste brasileiro, já Sampaio (2003, apud Ferreira, 2011) diz que o fator de maior influência no comportamento da vegetação, principalmente em regiões semiáridas, é representado pela precipitação, uma vez que esta exerce importante papel na distribuição das espécies, produção de biomassa, configuração do relevo e condições edáficas.

Lacerda et al (2010) admite que o nordeste apresenta uma acentuada variabilidade interanual, caracterizando-se por apresentar, em relação à precipitação, anos muito secos e outros chuvosos, conforme é mostrado na Figura 3. Tal variabilidade interanual pode ser observada também nos climogramas (Figura 2), assim como na variação interanual que ocorreu nos anos analisados.

Figura 3. Série temporal das anomalias de chuva na região do semiárido do Nordeste do Brasil durante o período chuvoso Fevereiro/Março/Abril/Maio. As anomalias se referem à média histórica de 1961 a 2009, que é de 541 mm. Fonte: CPTEC/INPE, 2012.

3.2 Análise do NDVI

Analisando a variação do NDVI (Figura 4), durante o período seco

(24/08/1992, 09/08/1998 e 24/09/2009) e chuvoso (12/12/1991, 04/12/2000 e 27/11/2009), observam-se as mudanças

espacial e temporal na concentração da vegetação de caatinga e das áreas de agricultura irrigada no município. A deciduidade e formação de novas folhas no bioma caatinga obedecem a uma relação direta com a quantidade de chuvas (Amorim, Sampaio, Araújo, 2009), uma vez que,

durante o período seco as espécies da caatinga liberam suas folhas diminuindo assim a superfície de perda de água para o meio através da evapotranspiração. Já no período chuvoso ocorre a renovação das copas, época em que as espécies do bioma caatinga encontram-se exuberantes.

Figura 4. Índice de Vegetação da diferença Normalizada (IVDN), para os períodos seco (24/08/1992, 09/08/1998 e 24/09/2009) e chuvoso (12/12/1991, 04/12/2000 e 27/11/2009).

A concentração de vegetação com baixa atividade fotossintética teve maior presença nas imagens antecedidas por meses com baixos índices pluviométricos. Em 24/09/2009 foram encontrados os maiores percentuais das classes de 0 – 0,200, com frequência de 41,95% da área total do município, situação explicada pela baixa ocorrência de chuvas nos três meses anteriores a obtenção da imagem. Segundo Liu et. al., (1991, apud Gurgel et. al., 2003), a maior correlação entre o NDVI e a quantidade de precipitação ocorre quando se compara o NDVI com a precipitação do mês anterior.

O ano de 1998 foi marcado por um dos mais intensos eventos de El Niño e o mais prolongado período de estiagem dentre os anos analisados (Figura 2). O NDVI para a data de 09/08/1998 apresentou percentual de 58,94% da área de estudo com valores entre 0,201 – 0,300, indicando o período de deciduidade da caatinga. (Ponzoni e Shimabukuro, 2010) afirmam que o NDVI apresenta alta correlação com a quantidade de clorofila presente na vegetação. Em períodos de alta atividade fotossintetizante os valores de NDVI tendem a aumentar, o contrário ocorre quando as espécies da caatinga liberam suas folhas.

Comparando as imagens do período seco, percebe-se um maior destaque nas áreas de agricultura irrigada, sendo notória a expansão do perímetro irrigado de 1992 a 2009 que, antes se concentrara na região sul do município e avançou um pouco mais para

o centro do mesmo. Tal área apresentou valores de NDVI superiores a 0,400, enquanto as espécies da caatinga apresentaram valores entre 0 – 0,300. Choudhury (1992), afirma que as características da vegetação natural da caatinga contrastam com as das culturas implantadas que apresentam alta atividade fotossintética e a dominância de poucas espécies. Este fato demonstra a capacidade do NDVI em diferenciar as áreas de agricultura irrigada da vegetação de caatinga em regiões semiáridas durante as épocas de estiagem na região.

Destaque pode ser dado neste trabalho à imagem do ano de 2009, visto que o NDVI foi obtido para o período seco e chuvoso permitindo avaliar as condições biofísicas das espécies da caatinga em dois momentos distintos dentro do mesmo ano (seco e chuvoso). No NDVI de 24/08/2009, nota-se que a caatinga apresenta valores inferiores a 0,301 com 41,95% da área total municipal entre os intervalos de 0 – 0,200 e 49,32% entre 0,201 – 0,300, condição explicada pelos baixos índices pluviométricos no mês anterior, com total de 18,6mm. Já o NDVI de 27/11/2009, que influenciado pelas precipitações ocorridas entre os dias 25/09/2010 e 28/09/2010 (Figura 5) com precipitação superior a 70 mm, os valores de NDVI estiveram predominantemente entre os intervalos de 0,301 – 0,400 (35,49%) e 0,401 – 0,500, período em que a caatinga apresenta maior quantidade de clorofila.

O NDVI (Figura 4) do dia 04/12/2000

observa-se uma maior atividade da vegetação corroborado pelo NDVI que está relacionado com o teor de clorofila (Júnior, Hermuche e Guimarães, 2006), com 96,81% da área total do município apresentando elevada atividade das espécies da caatinga, situação justificada pela melhor distribuição mensal da precipitação durante o ano e precipitação de 145mm no mês anterior à data da imagem concentradas entre os dias 02/11/2000 e 15/11/2000 (Figura 6). Oliveira et al (2009) destaca que no período úmido ocorre desenvolvimento do mesófilo, a alta produção

da fotossíntese pelos cloroplastos e o aumento do dossel, facilitando com isso a obtenção dos dados pelo NDVI devido a sua sensibilidade ao teor de clorofila. O aumento do NDVI neste período também esteve associado ao período de atividade das culturas irrigadas na parte sul do município e sequeiro na porção norte.

A aplicação do NDVI para o período seco permitiu observar a expansão das áreas destinadas à agricultura irrigada, percebendo-se claramente o crescimento durante o período observado, 1992 a 2009.

Figura 5. Pluviograma com a precipitação diária dos meses de outubro e novembro de 2009.

Figura 6. Pluviograma com a precipitação diária dos meses de outubro e novembro de 2000.

3.3 Análise do NDWI

O índice proposto por Gao (1996) trabalha com dois canais do infravermelho e mede a quantidade de água líquida presente na vegetação. Trabalhos como os de Ferreira et al (2011), Gao (1996), De Alwis (2007), Oliveira et al (2010), corroboram à efetividade do NDWI na caracterização e distinção de diversos tipos de vegetação, principalmente durante o período úmido.

Na Figura 7 é representada a variação espacial e temporal do NDWI, calculados para as imagens adquiridas durante os períodos seco (24/08/1992, 09/08/1998 e 24/09/2009) e chuvoso (12/12/1991, 04/12/2000 e 27/11/2009). Observa-se que para as imagens do período seco antecedidas por meses com baixa pluviometria, os valores de NDWI apresentaram-se negativos ($NDWI < 0$) correspondendo à vegetação seca, solo exposto e áreas urbanas, já os valores de NDWI superiores a 0,100, foram identificados nas áreas de agricultura irrigada, corroborando com os dados obtidos por Gao (1996) durante a elaboração do NDWI, onde o mesmo afirma que é esperada sensibilidade do NDWI para mudanças na água (líquida) presente na vegetação, uma vez que o aumento da água faz com que os valores do NDWI variem quase que linearmente positivo. Este índice é importante nos estudos referentes ao vigor da vegetação, mudança na biomassa e estresse hídrico das plantas (Cardozo et. al., 2009; Jensen, 2009).

Pode-se observar uma relação entre os

valores de NDVI de 0 – 0,400 e $NDWI < 0$, já para áreas com NDVI superiores a 0,400 o NDWI apresentou valores superiores a 0,100. No entanto é importante ressaltar que o NDWI apresentou melhor resposta quanto à discriminação das áreas de agricultura irrigada em relação às espécies da caatinga. Resultados encontrados por Ferreira et. al., (2011) em estudo realizado no município de Petrolina.

De acordo com Gao (1996) comparando o NDWI com o NDVI, o primeiro apresenta melhores resultados quanto ao estresse hídrico e mudanças de biomassa, o mesmo completa que os valores do NDWI aumentam conforme o número de camadas de folhas aumenta, indicando assim que o NDWI é sensível à quantidade total de água (líquida) nas folhas empilhadas. Jackson et. al. (2004), percebeu que em áreas com elevada atividade vegetativa o NDVI satura, enquanto o NDWI continuava a mensurar o conteúdo de água em culturas como o milho e soja.

Ainda em comparação entre o NDVI e o NDWI De Alwis et al (2007) afirma que em períodos em que a vegetação se encontra em estado ativo, ou seja, em períodos mais úmidos, o NDVI não permite diferenciar os valores do mesmo para diversos tipos de vegetação, e completa que a insensibilidade do NDVI à umidade do solo torna-o um bom representante na distinção da cobertura do solo, porém, um mau preditor no que diz respeito ao estado da umidade, incluindo com

isso as áreas de cobertura vegetal. Ainda no mesmo trabalho o autor indica que o NDWI conseguiu distinguir culturas de linha,

gramíneas, florestas caducifólias, florestas perenes, florestas mistas e arbustos, mesmo nos períodos com neve e de maior umidade.

Figura 7. Normalized Difference Water Index (NDWI), para os períodos seco (24/08/1992, 09/08/1998 e 24/09/2009) e chuvoso (12/12/1991, 04/12/2000 e 27/11/2009).

É perceptível na imagem do NDWI de 04-12-2000 (Figura 7), assim como, na do NDVI (Figura 4), maior parte do município com valores elevados quando comparado com as outras imagens do período chuvoso, este fato se deve a sensível resposta que o NDWI tem a presença de água, e mais precisamente na espessura em que a mesma ocorre (GAO, 1996). Unindo a sensibilidade do NDWI com a capacidade de armazenamento de água da vegetação da caatinga e o elevado índice de chuvas ocorridas nos dias anteriores (perceptível na Figura 6) pôde-se diferenciar uma maior quantidade de alvos na imagem.

Quanto a capacidade de armazenamento de água pela vegetação da caatinga Parente (2009) – em sua tese de doutorado – ressalta que:

“ Algumas características morfológicas das plantas, como espessura da cutícula, textura da lâmina foliar, densidade da madeira e a profundidade e biomassa do sistema radicular podem explicar a relação entre a conservação de água nas plantas que interfere nas suas fenofases. ”

Na imagem de 27-11-2009 não é possível obter um resultado com tanta precisão, no que diz respeito à distinção dos alvos da vegetação natural, como na de 2000, pois, a última ocorrência de chuva no município foi entre os dias 26 e 28-10-2009 (Figura 5), isso corrobora com as conclusões obtidas por De Alwis et al (2007) em seu trabalho *Unsupervised classification of saturated areas using a time series of remotely sensed images*, onde o mesmo identificou a diminuição drástica dos valores do NDWI após um curto período de 15 dias sem

precipitação, neste caso não houve diminuição drástica dos valores devido à capacidade de armazenamento da vegetação local. Barbosa et al. (2003) ressaltam que espécies com madeiras menos densas armazenam mais água nos caules, suportando melhor a época do período seco.

3.4 Temperatura da Superfície

Na Figura 8 podem ser observadas as imagens com os dados de temperatura da superfície para o período seco (24/08/1992, 09/08/1998 e 24/09/2009) e chuvoso (12/12/1991, 04/12/2000 e 27/11/2009). No período seco destaca-se o ano de 1998 com temperaturas mais amenas em sua totalidade quando comparadas as demais cartas de temperatura do mesmo período, tendo as menores temperaturas presente nas áreas de agricultura irrigada.

Correlacionando as imagens do período seco da Temperatura da Superfície (Figura 8) com as do NDVI (Figura 4) e NDWI (Figura 7), é possível identificar temperaturas mais baixas ocorrendo nas áreas de predominância da agricultura irrigada e com pequenos corpos hídricos. Torna-se notável, também, a relação entre as áreas com menores valores de NDVI e NDWI àquelas com maior Temperatura da Superfície, principalmente quanto ao primeiro no que diz respeito às imagens do período seco.

Com relação às imagens do período chuvoso das Temperaturas da Superfície quando relacionadas às do NDWI, observa-se menor

temperatura nas regiões com maiores valores do mesmo, ou seja, onde a vegetação continha mais presença de água. Já as temperaturas elevadas das imagens do período

chuvoso da Temperatura da Superfície podem ser relacionadas com as áreas onde os valores do NDVI são menores, assim como, naquelas do período seco.

Figura 8. Índice de Temperatura da Superfície para os períodos seco (24/08/1992, 09/08/1998 e 24/09/2009) e chuvoso (12/12/1991, 04/12/2000 e 27/11/2009).

4. Conclusões

A vegetação da caatinga comportou-se de acordo com a ocorrência da precipitação, tendo nos períodos chuvosos valores mais elevados para os índices de vegetação e, conseqüentemente, temperatura da superfície mais amena, e nos períodos secos baixos valores dos índices e altas temperaturas.

Em áreas de agricultura irrigada ocorreram valores elevados dos índices de vegetação e baixa temperatura da superfície, embora o NDWI tenha se comportado melhor que o NDVI nos períodos chuvosos.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a FACEPE pelo financiamento de bolsa de iniciação científica para o primeiro autor. A PROAES-UFPE pelo financiamento de bolsa para o segundo autor. Ao CNPQ pela bolsa de Mestrado cedida ao terceiro autor. A CAPES pela bolsa de doutorado do quarto autor. Ao INPE, por ceder as imagens de satélite através do Catálogo de Imagens de Satélite. Ao ITEP/LAMEPE, por ceder os dados pluviométricos e de temperatura do ar. Ao CNPq, pelo financiamento da Rede SerCaatinga, Processo nº558074/2009-0 e ao SERGEO - UFPE.

6. Referências

Amorim, I. L.; Sampaio, E. V. S. B.; Araújo, E. L. (2009). Fenologia de espécies lenhosas da caatinga do Seridó, RN. *Revista Árvore*, v.33, n.3, p.491-499.

Aragão, J. O. R. (1976). Um estudo da estrutura das perturbações sinóticas no Nordeste do Brasil. 1976. 55f. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Barbosa, T. F.; Correia, M. F. (2005). Sistemas convectivos intensos no semiárido brasileiro: o controle da grande escala. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.20, n.3, 395-410.

Choudhury, B.J. (1992). Multispectral satellite observations for arid land studies. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v.47, p.101-126.

Christofolletti, A. (2009). Modelagem de sistemas ambientais. Edgard Blucher: São Paulo.

Citeau, J.; Bergés, J. C.; Demarcq, H.; Mahé, G. (1988b). The watch of ITCZ migrations over tropical Atlantic as an indicator in drought forecast over Sahelian area. *Ocean-Atmosphere Newsletter*, sv(45): p.1-3.

Citeau, J.; Bergés, J. C.; Demarcq, H.; Mahé, G. (1988a). Position de la Zone de Convergence a 28 et température de surface de l'ocean. *Veille Climatique Satellitaire*, sv(21). p3-7.

Dealwis D. A.; Easton, Z. M.; Dahlke, H. E.; Philpot, W. D.; Steenhuis, T. S. (2007). Unsupervised classification of saturated areas using a time series of remotely sensed images.

Hydrology and Earth System Sciences Discussions, v.4, p.1663–1696.

Ferreira, H. S.; Silva, H. A.; Oliveira, T. H.; Neto, R. X. M.; Galvêncio, J. D.; Pimentel, R. M. M. (2011). Avaliação dos parâmetros biofísicos da vegetação de caatinga e agricultura irrigada do município de Petrolina – PE através do NDVI, NDWI e Temperatura da Superfície. In. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., Curitiba. Anais... Curitiba: INPE, 2011, p.1843-1851.

Gao, B.C. (1996). NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote sensing of Environment, v.58, p.257-266.

Hastenrath, S., Lamb. (1977). Climatic Atlas of the Tropical Atlantic and Eastern Pacific Oceans. University of Wisconsin Press.

Hastenrath, S; Heller, L. (1977). Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. Quartely Journal of the Royal Meteorological Society, n.103: 77-92.

Huete, A. R. (1988). Adjusting vegetation indices for soil influences. International Agrophysics, v.4, n.4, p.367-376.

Júnior, O. A. C.; Hermuche, P. M.; Guimarães, R. F. (2006). Identificação regional da floresta estacional decidual na bacia do Rio Paranã a partir da análise multitemporal de imagens MODIS. Revista Brasileira de Geofísica, v.24, n.3, p.319-332.

Kousky, V. E. (1980). Diurnal rainfall variation on Northeast Brazil. Mon. Wea. Rew 108, 488.

Lacerda, F.F.; Silva Junior, H.D.; Assad; E.D.; Assis, J.M.O.; Moura, M.S.B. (2010). Extremos e variabilidade climática no nordeste brasileiro e em Pernambuco. In: Galvêncio, J.D. (Org.). Mudanças climáticas e impactos ambientais. EDUFPE: Recife, p.1-24.

Marengo, J.A; Alves, L.M.; Beserra, E.A.; Lacerda, F.F. (2011). Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. In. Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas. Instituto Nacional do Semiárido: Campina Grande, p.384-422.

Markham, B.L.; Barker, L.L. (1987). Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. International Journal of Remote Sensing, v.8, n.3, p.517-523.

Moura, D. C.; Melo, J. I. M.; Schlindwein, C. (2007). Visitantes Florais de Boraginaceae A. Juss. no Baixo Curso do Rio São Francisco: Alagoas e Sergipe. Revista Brasileira de Biociências, Porto Alegre, v.5, supl.1, p.285-287.

Nobre, C.A. (2007). Mudanças Climáticas Globais e o Brasil: Porque Devemos nos Preocupar. Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia, v.30, p.7-11.

Oliveira, T. H.; Machado, C. C. C.; Silva, J.

S.; Galvêncio, J. D.; Pimentel, R. M. M.; Silva, B. B. (2010). Índice de Umidade (NDWI) e Análise Espaço-Temporal do Albedo da Superfície da Bacia Hidrográfica do Rio Moxotó-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.3, p.55-69.

Oliveira, W. M.; Chaves, I. B.; Lima, E. R. V. (2009). Índices espectrais de vegetação de caatinga em um Neossolo Litólico do semiárido paraibano. In. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. Anais... Natal: INPE, 2009, p.2103-2110.

Parente, H. N. (2009). Avaliação da vegetação

e do solo em áreas de caatinga sob pastejo caprino no Cariri da Paraíba. 160f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba, Areia.

Santos, A. M.; Galvêncio, J. D.; Moura, M. S. B. (2010). Os recursos hídricos e as mudanças climáticas: discursos, impactos e conflitos. *Revista Geográfica Venezolana*, v.51, n.1, p.59-68.

Virji, H. (1987). A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds, *Mon. Weather Rev.*, 109, p.599-610.