

PARÂMETROS BIOFÍSICOS NA DETECÇÃO DE MUDANÇAS AMBIENTAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PAJEÚ

Eberson Pessoa Ribeiro¹, Ranyére Silva Nóbrega², Fernando de Oliveira Mota Filho³, Elvis Bergue Mariz Moreira⁴

¹Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE) e Doutorando do Departamento de Ciências Geográficas. UFPE. Email: eberson_pessoa@yahoo.com.br

²Professor adjunto do Departamento de Ciências Geográficas. UFPE. Email: ranyere.nobrega@yahoo.com.br

³Professor associado do Departamento de Ciências Geográficas. UFPE. Email: fmota@gmail.com

⁴Pós-doutorando do Departamento de Ciências Geográficas. UFPE. Email: elvisberg@hotmail.com.br

Artigo recebido em 24/06/2015 e aceito em 30/07/2015

RESUMO

As análises espaciais e temporais dos diversos parâmetros biofísicos permitem detectar e avaliar no ambiente os impactos e as degradações decorrentes do uso e ocupação do solo, bem como orientar o estabelecimento de políticas de reversão em um quadro de degradação ambiental. Dessa forma, a presente pesquisa teve como objetivo identificar e analisar a dinâmica espaço-temporal dos parâmetros de albedo da superfície, NDVI, NDWI e temperatura de superfície na detecção de mudanças ambientais na bacia hidrográfica do rio Pajeú com aplicação de alguns componentes do algoritmo SEBAL. Para a obtenção de tais estimativas foram empregadas imagens MODIS para os anos de 2003, 2005, 2007, 2012, 2013 e 2014. Os resultados obtidos revelaram que a parte sul da bacia hidrográfica do rio Pajeú é a mais degradada, apresentando temperaturas mais altas, menor umidade e com risco de desertificação. Conclui-se que os parâmetros biofísicos avaliados pelo algoritmo SEBAL são eficazes e eficientes na compreensão da dinâmica dos padrões espaciais, temporais e espectrais de ambientes semiáridos como a bacia hidrográfica do rio Pajeú.

Palavras-chave: Caatinga; Degradação ambiental; NDVI; NDWI.

BIOPHYSICAL PARAMETERS IN DETECTING ENVIRONMENTAL CHANGE IN THE WATERSHED PAJEÚ RIVER

ABSTRACT

The spatial and temporal analysis of various biophysical parameters can detect and evaluate environmental impacts and degradation from the use and occupation, such as guide the establishment of reversal of policies in a framework of environmental degradation. This way, this research aimed to identify and analyze the spatio-temporal dynamics of the surface albedo parameters, NDVI, NDWI and surface temperature to detect environmental changes in the Watershed Pajeú River with application of some components of the algorithm SEBAL. To obtain such estimates were used MODIS images for the years 2003, 2005, 2007, 2012, 2013 and 2014. The results showed that the southern part from Watershed Pajeú River is the most degraded, with higher temperatures, lower humidity and at risk of desertification. We conclude that the biophysical parameters evaluated by SEBAL algorithm are effective and efficient in understanding the dynamics of spatial patterns, temporal and spectral semi-arid environments such as the watershed Pajeú River.

Keywords: Caatinga; Environmental degradation; NDVI; NDWI.

INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto tem sido imprescindível no monitoramento ambiental de bacias hidrográficas por meio das análises espaço-temporais dos diversos parâmetros biofísicos, os quais permitem avaliar no ambiente os impactos e as degradações decorrentes do uso e ocupação do solo. Segundo Cunha *et al.* (2012), esse monitoramento permite diagnosticar alterações antrópicas e/ou naturais na paisagem, bem como orientar o estabelecimento de políticas de reversão em um quadro de degradação ambiental.

De acordo com Oliveira (2012, p. 36), “estudos da dinâmica espaço-temporal de parâmetros biofísicos possibilitam detectar e entender as modificações nas feições da superfície terrestre bem como as alterações climáticas ao longo do tempo”. Para análise dos diversos parâmetros biofísicos com o algoritmo SEBAL vários trabalhos (COSTA FILHO, 2005; ROSENDO; ROSA, 2005; IMMERZEEL; GAUR; SWART, 2008; ANDRADE *et al.*, 2009; CUNHA *et al.*, 2009) utilizaram produtos do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS).

O uso do sensoriamento remoto tem-se destacado no estudo de ambientes em processo de degradação como uma das alternativas para avaliar e monitorar as mudanças ocorridas ou que venha a ocorrer (CUNHA *et al.*; 2009; LOPES *et al.*, 2010; RAMOS *et al.*, 2011; CUNHA *et al.*; 2012; BEZERRA *et al.*, 2014; SALLO *et al.*, 2014). Neste contexto, o estudo das estimativas dos parâmetros biofísicos de albedo da superfície, NDVI, EVI, SAVI, IAF, NDWI e Temperatura de superfície têm se sobressaído no processo investigativo das mudanças ambientais e monitoramento das áreas degradadas.

Para tanto, utilizou-se alguns componentes do algoritmo *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) proposto por Bastiaanssen (1995), por causa de sua precisão e praticidade na avaliação dos referidos parâmetros no sistema solo-planta-atmosfera, bem como imagens multiespectrais obtidas pelos sensores MODIS dos Satélites TERRA e AQUA.

As estimativas de parâmetros biofísicos são de suma importância nos estudos da agricultura irrigada, de uso e ocupação do solo, da degradação ambiental, dos riscos de desertificação, entre tantas outras aplicações. Diante do exposto, a presente pesquisa teve como objetivo identificar e analisar a dinâmica espaço-temporal dos parâmetros de albedo da superfície, NDVI, NDWI e temperatura de superfície na detecção de mudanças ambientais na bacia hidrográfica do rio Pajeú com aplicação de alguns componentes do algoritmo SEBAL.

REFERENCIAL TEÓRICO

A quantificação dos parâmetros biofísicos (albedo, índices de vegetação, emissividade, temperatura de superfície, saldo de radiação, fluxo de calor no solo e evapotranspiração) vem sendo amplamente estudados destacando-se as pesquisas de Liu; Ming (1998), Moreira; Shimabukuro (2004), Silva; Lopes; Azevedo (2005), Arroyo (2007), Lira (2008), Andrade *et al.* (2009), Andrade; Bernardi; Grego (2010), Oliveira *et al.* (2012), Cunha *et al.* (2012), Bezerra *et al.* (2014), entre tantos outros que realizam pesquisas com a referida temática, como se pode destacar nas pesquisas descritas nos parágrafos seguintes.

No Estado de Pernambuco, os estudos de parâmetros biofísicos foram aplicados às bacias hidrográficas dos rios Tapacurá, Pajeú e Brígida por Oliveira *et al.* (2012), Ramos *et al.* (2011) e Lopes *et al.* (2010), respectivamente. Em todas as bacias os resultados revelaram avanço na degradação dos recursos naturais, sobretudo na redução da cobertura vegetal, permitindo identificar alterações do uso e ocupação do solo.

Do mesmo modo, Bezerra *et al.* (2014) investigaram as variáveis biofísicos para a unidade de conservação do Parque Nacional da Furna Feia e suas adjacências, situada entre os municípios de Mossoró e Baraúna na região semiárida do estado do Rio Grande do Norte com o objetivo de avaliar a dinâmica espaço-temporal dos parâmetros de albedo da superfície, NDVI e temperatura de superfície para o período de 2007 a 2010. Os resultados permitiram identificar diferenças nos padrões espaciais e temporais dos parâmetros biofísicos em resposta ao uso e à ocupação do solo, demonstrando o potencial das geotecnologias, a compreensão da dinâmica dos padrões espaciais e temporais dos processos biofísicos de interação solo-planta-atmosfera da caatinga no semiárido.

No semiárido paraibano, a estimativa de parâmetros biofísicos em diferentes tipos de uso e ocupação do solo na bacia experimental de São João do Cariri foi pesquisada por Silva; Silva; Silva (2014) na qual realizaram uma análise espacial dos impactos ambientais decorrentes de tais mudanças, empregando técnicas de classificação de imagens TM – Landsat 5 e o algoritmo SEBAL. Os resultados apresentaram vegetação mais densa nas áreas em torno da rede hidrográfica da bacia onde se concentraram as menores temperaturas e os maiores valores de saldo de radiação, invertendo esses valores à medida que a vegetação se tornava rasteira até chegar ao solo exposto. Concluíram que a técnica de sensoriamento remoto capturou de maneira evidente as variações entre os parâmetros estimados, mostrando que o SEBAL é uma boa alternativa para o estudo dos componentes do balanço de radiação em áreas abrangentes.

Na pesquisa da dinâmica da cobertura vegetal da bacia hidrográfica do rio do Peixe, também no semiárido paraibano, Cunha *et al.* (2012) realizaram uma análise multitemporal de variáveis biofísicas derivadas de imagens TM – Landsat 5 para o período de 23 anos. Os resultados apontam para uma recuperação da cobertura vegetal, mais evidente nos trechos mais declivosos da bacia, fato relacionado ao êxodo da população rural ocorrido no período estudado.

Com o objetivo de avaliar os parâmetros biofísicos (NDVI, temperatura da superfície, saldo de radiação diária e evapotranspiração) na bacia do rio Corumbataí, Estado de São Paulo, Giongo; Vettorazzi (2014) utilizaram dez imagens TM – Landsat 5 obtidas nos anos de 2008, 2009 e 2010; juntamente com o Modelo Numérico do Terreno (MNT), para considerar a inclinação e sentido de declive do terreno, além da aplicação do *Mapping Evapotranspiration at High Resolution and with Internalized Calibration* (METRIC). A pesquisa permitiu identificar as variações espaciais e temporais de diferentes coberturas no mapeamento das variáveis biofísicas.

Sallo *et al.* (2014) procuraram realizar um estudo que estimou alguns componentes do balanço de radiação em áreas distintas no município de Lucas do Rio Verde–MT com base em imagens TM – Landsat 5 para as datas de 20/01 e 26/04 do ano de 2010. Os resultados evidenciaram alta variabilidade no saldo de radiação, albedo e NDVI tanto entre as distintas coberturas quanto para as distintas datas. As áreas de floresta secundária e reflorestamento de eucaliptos apresentaram magnitudes similares, enquanto as áreas com cultivos agrícolas apresentaram valores inerentes aos estágios de desenvolvimento com complexa interação radiativa.

Diante do exposto foram adotados nesta pesquisa alguns parâmetros biofísicos dentre eles está albedo da superfície (α). De acordo com Liu (2006, p. 253) “o albedo (α) é como a reflectância da radiação solar pela superfície terrestre que cobre a faixa do comprimento de onda eletromagnética de 0,4 μm a 3 μm (visível ao infravermelho médio)”. De tal maneira, a reflectância varia segundo o comprimento de onda da radiação incidente em função das características físico-químicas da superfície e da atmosfera (GIONGO, 2008; GIONGO *et al.*, 2010).

O albedo da superfície fornece informações valiosas para investigação da transferência de energia entre a superfície terrestre e a atmosfera, o que possibilita a modelagem climática regional e global. Portanto, qualquer modificação nas características da superfície tem impacto sobre as estimativas de albedo e, conseqüentemente, mudanças no cenário de uma região (SHUAI *et al.*, 2011; GAMARRA, 2012; GUSMÃO *et al.*, 2013).

O *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) foi empregado com sucesso por diversos pesquisadores (RÊGO *et al.*, 2012; COUTO JÚNIOR *et al.*, 2013; SILVA *et al.*,

2014, dentre tantos outros) é calculado pela combinação das refletividades das bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED), o que proporciona uma alta refletividade na copa da vegetação por ser bastante sensível à clorofila (CHEN; HUANG; JACKSON, 2005).

A vantagem do NDVI é que ele elimina parcialmente as interferências atmosféricas, uma vez que encobre parcialmente os efeitos de presença dos constituintes atmosféricos e das perturbações radiométricas, constituindo um índice relevante para o monitoramento das condições vegetais e das variabilidades bioclimáticas na superfície terrestre (LIU, 2006). Rouse *et al.* (1973) normalizaram o NDVI a razão simples para o intervalo de -1 a +1.

A aplicação do Índice de Água por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Water Index* – NDWI) em estudos de monitoramento e mapeamento de mudança de uso e cobertura do solo em bacias hidrográficas, no monitoramento do estresse hídrico da vegetação em ambiente de semiárido, bem como a estimativa da quantidade de água em culturas tem se destacado nos trabalhos de Cardozo *et al.* (2009), Oliveira *et al.* (2010), Jaboinski (2011), Morais; Santos; Stevaux (2012), Couto Júnior *et al.* (2013), Albuquerque *et al.* (2014), entre outros.

Derivado do NDVI, o NDWI foi desenvolvido por Gao (1996) para o delineamento do teor de água presente nas folhas, através da combinação das bandas do infravermelho próximo (ρ_{IV}) e do infravermelho médio (ρ_{MIR}), em que os valores negativos representam áreas com vegetação seca e valores positivos para vegetação verde (GAO, 1996; CARDOZO *et al.*, 2009).

A irregularidade da distribuição dos recursos hídricos, como também da precipitação pluviométrica no semiárido do nordeste brasileiro faz com que o NDWI seja um índice extremamente importante nos estudos da cobertura vegetal dessa área, pois permite acompanhar as mudanças na biomassa e avaliar o estresse hídrico da vegetação, além de auxiliar as tomadas de decisões nas culturas irrigadas e previsão de safra (PEÑUELAS *et al.*, 1993; GALVÃO; FORMAGGIO; TISOT, 2005; JENSEN, 2009).

De acordo com Liu (2006, p. 284) a temperatura da superfície (T_s) está “diretamente ligada à estimativa de fluxos de radiação onda longa e indiretamente ligada à dos fluxos de balanço de energia da superfície”. Ainda segundo o autor a temperatura da superfície é um parâmetro chave para diversos estudos ambientais como o monitoramento de condições vegetais, variabilidades bioclimáticas, nas estimativas de processos de modificação da superfície da Terra referente à hidrologia, ecologia e nas aplicações de modelos de previsão das mudanças climáticas globais e regionais (OLIVEIRA, 2012).

Esses parâmetros fornecem produtos passíveis de comparações consistentes de dados espaciais e temporais das condições biofísicas da bacia hidrográfica, permitindo detectar as mudanças ambientais, como também o monitoramento do uso e ocupação do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização da área

A bacia hidrográfica do rio Pajeú situa-se na zona fisiográfica do Sertão de Pernambuco entre as coordenadas de 07°16'20" e 08°56'01" de latitude Sul, e 36°59'00" e 38°57'5" de longitude Oeste. A área pesquisada está situada na microrregião do Sertão do Pajeú, parte das microrregiões do Sertão do Moxotó, do Salgueiro e de Itaparica compondo a Unidade de Planejamento Hídrico 9 – UP9 (SECTMA, 1998).

Imagens do sensor MODIS dos satélites Terra e Aqua

Para a obtenção das estimativas dos parâmetros biofísicos neste trabalho foram empregados dois produtos MODIS dos satélites Terra (MOD) e Aqua (MYD) para os anos de 2003, 2005, 2007, 2012, 2013 e 2014. Esses produtos foram obtidos gratuitamente no *Global Visualization Viewer* (GLOVIS) da *United States Geological Survey* (USGS) através do site <http://glovis.usgs.gov>. O *tile* que a bacia hidrográfica do rio Pajeú está inserida é o h14-v09.

O critério de seleção desses produtos foi o de menor presença de nuvens para o período de transição da distribuição temporal da precipitação (maio, junho e julho), ou seja, entre a quadra chuvosa (janeiro a abril) e os meses mais secos (agosto a dezembro) na bacia hidrográfica estudada (Tabela 1). Ressalta-se que a escolha das imagens para o período de transição justifica-se por permitir uma visualização realçada dos contrastes da cobertura vegetal e das áreas degradadas.

Tabela 1: Produtos da superfície terrestre gerados pelo sensor MODIS

| Imagem | DSA | Data | Horário de passagem (h) | Satélite |
|--------|-----|------------|-------------------------|-----------|
| 01 | 174 | 23/06/2003 | 10:12 | Terra/MOD |
| 02 | 207 | 26/07/2005 | 10:36 | Terra/MOD |
| 03 | 199 | 18/07/2007 | 13:18 | Aqua/MYD |
| 04 | 132 | 12/05/2012 | 13:18 | Aqua/MYD |
| 05 | 197 | 16/07/2013 | 10:36 | Terra/MOD |
| 06 | 154 | 03/06/2014 | 10:24 | Terra/MOD |

Legenda: DSA = Dia Sequencial do Ano.

Os produtos MODIS aplicados na construção desta pesquisa foram o MOD11A1 ou MYD11A1 que possuem 12 camadas com resolução espacial de 1 km das quais foram utilizadas a da temperatura da superfície (K), a do horário local e a das emissividades das bandas 31 e 32

de cada *pixel*; e o MOD09GA ou MYD09GA com a camada do ângulo zenital solar – Z (em graus) na resolução espacial de 1 km e as reflectâncias da superfície referentes às bandas de 1 a 7 com resolução espacial de 500 m.

As imagens do MODIS são disponibilizadas pelo GLOVIS já georeferenciadas e corrigidas aos efeitos atmosféricos no formato *Hierarchical Data Format* (HDF). De tal modo foi necessário à transformação das mesmas de HDF para o formato *Imagine Image* (IMG). Em seguida foram aplicados os fatores de correção (multiplicador e adicional) pertinentes a cada camada utilizada, conforme informações da Tabela 2, de maneira que a resultante desta operação reporte o real valor da variável no *pixel* da imagem na bacia hidrográfica investigada.

Com o fator multiplicador 0,1 (Tabela 2) foi possível verificar os horários de passagem do satélite na captura das cenas do MOD11A1 / MYD11A1 por meio da terceira camada (*Day_view_time*), com se pode observar na Tabela 1. Salienta-se também que foi selecionada a hora de passagem (h) referente ao *pixel* central da bacia hidrográfica do rio Pajeú.

Tabela 2: Fatores (multiplicador e adicional) e resoluções (temporal e espacial) das imagens MODIS empregados

| Discriminação da camada | Fatores | | Resoluções | |
|--|---------------|-----------|------------|----------|
| | Multiplicador | Adicional | Temporal | Espacial |
| MOD11A1 ou MYD11A1 | | | | |
| Temperatura da superfície (K) | 0,02 | – | Diária | 1 km |
| Horário local (hora) | 0,1 | – | Diária | 1 km |
| Emissividade de cada <i>pixel</i> banda 31 (-) | 0,002 | 0,490 | Diária | 1 km |
| Emissividade de cada <i>pixel</i> banda 32 (-) | 0,002 | 0,490 | Diária | 1 km |
| MOD09GA ou MYD09GA | | | | |
| Ângulo Zenital Solar (graus) | 0,01 | – | Diária | 1 km |
| Reflectância banda1 (620–670 nm) (-) | 0,0001 | – | Diária | 500 m |
| Reflectância banda2 (841–876 nm) (-) | 0,0001 | – | Diária | 500 m |
| Reflectância banda3 (459–479 nm) (-) | 0,0001 | – | Diária | 500 m |
| Reflectância banda4 (545–565 nm) (-) | 0,0001 | – | Diária | 500 m |
| Reflectância banda5 (1230–1250 nm) (-) | 0,0001 | – | Diária | 500 m |
| Reflectância banda6 (1628–1652 nm) (-) | 0,0001 | – | Diária | 500 m |
| Reflectância banda7 (2105–2155 nm) (-) | 0,0001 | – | Diária | 500 m |

Fonte: NASA (2014).

Finalizadas essas etapas foram executados o processamento das imagens por meio do *Model Maker* do *software ERDAS Imagine* versão 9.1, bem como a produção das cartas temáticas através do *software ArcGis* 9.3, ambos com licença do Departamento de Ciências Geográficas da Universidade Federal de Pernambuco (DCG/UFPE), sendo as imagens orbitais projetadas no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS-2000) e recortadas para a área de estudo.

Parâmetros biofísicos

A modelagem dos parâmetros biofísicos foi estimada na determinação dos valores do albedo da superfície, do índice de vegetação (NDVI) e umidade (NDWI), além da temperatura de superfície. Portanto, obteve-se inicialmente o albedo da superfície (α) que é a razão entre a radiação solar global refletida e incidente atuantes em cada *pixel* (OLIVEIRA, 2012). Dessa maneira, para o cômputo do albedo da superfície utilizou-se a Equação 1 sugerida por Tasumi; Allen; Trezza (2008):

$$\alpha = 0,215\rho_1 + 0,215\rho_2 + 0,242\rho_3 + 0,129\rho_4 + 0,101\rho_5 + 0,062\rho_6 - 0,036\rho_7 \quad (1)$$

na qual as reflectâncias monocromáticas relativas a cada uma das sete bandas espectrais do MODIS (MOD09GA) são representadas por ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , ρ_4 , ρ_5 , ρ_6 e ρ_7 .

O Índice de Vegetação analisado foi o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), o qual é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde que varia entre -1 e +1. Os valores negativos representam corpos hídricos e nuvens e próximo de 0 (zero) solo exposto. Quanto mais alto o NDVI mais representativa é a vegetação. Assim, o NDVI é alcançado pela razão entre a diferença das refletividades das bandas do infravermelho próximo (banda 2) e do vermelho (banda 1) e pela soma das mesmas como expressa a Equação 2 (ALLEN et al., 2002; LIU, 2006):

$$\text{NDVI} = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)} \quad (2)$$

em que ρ_2 e ρ_1 são as refletâncias das bandas 2 (0,841 a 0,876 nm) e 1 (0,620 a 0,670 nm) do produto MOD09GA, respectivamente. Proposto por Gao (1996), o NDWI foi obtido através da razão entre a diferença da refletividade do infravermelho próximo (ρ_{IV}) e do infravermelho médio (ρ_{MIR}), e a soma das mesmas (Equação 3)

$$\text{NDWI} = \frac{(\rho_2 - \rho_7)}{(\rho_2 + \rho_7)} \quad (3)$$

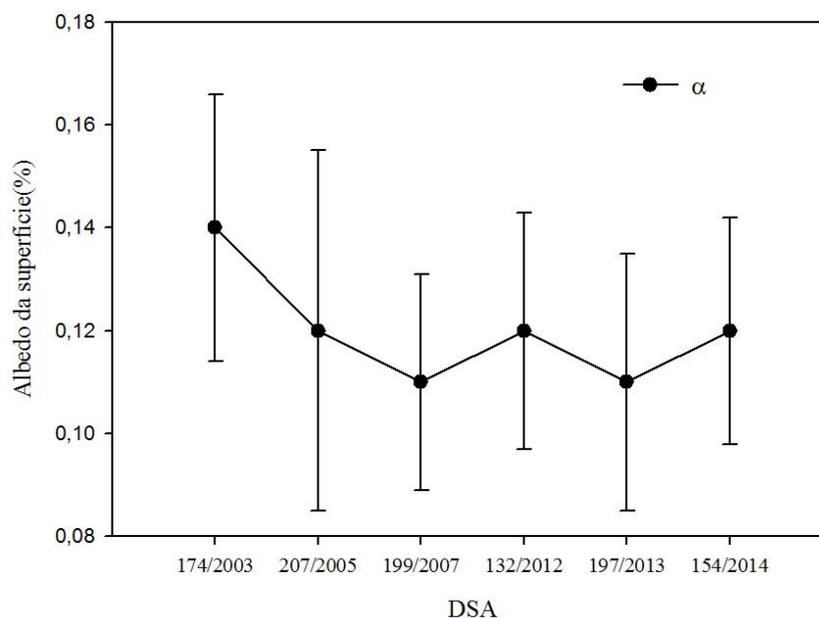
em que ρ_2 e ρ_7 são as refletâncias do infravermelho próximo, banda espectral 2 (0,841 a 0,876 nm), e do infravermelho médio, banda espectral 7 (2,105 a 2,155 nm), respectivamente. Já a temperatura da superfície foi obtida no produto MOD11A1. Nas imagens de temperatura da superfície (em graus Kelvin) foi aplicado o fator multiplicador 0,02 (Tabela 2) e transformadas em graus Celsius (°C).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A determinação de variáveis biofísicas tem sido empregada em estudos espaciais e temporais na detecção de mudanças ambientais, uma vez que o principal interesse é compreender as mudanças ocorridas na paisagem ao longo do tempo. De tal modo, quantificar e qualificar o grau de degradação por meio de aplicações dos parâmetros biofísicos tem importância vital em áreas de risco à desertificação. Contudo, em ambientes semiáridos, como o da bacia hidrográfica do rio Pajeú, a análise da cobertura vegetal é complexa face ao alto grau de variabilidade interanual da precipitação pluviométrica o que pode acarretar mudanças no meio, não estando relacionadas diretamente com efeitos de uso e ocupação do solo.

A Figura 1 destaca o gráfico dos valores médios e desvio padrão do albedo da superfície, em que foi constatada pequena variação (0,03) entre os valores médios das cenas analisadas, destacando-se 174/2003 com o maior percentual (0,14%) e 199/2007 e 197/2013 com os menores percentuais (0,11%). Em termos relativos as médias apresentaram baixa variação em todas as cenas com 0,05%, exceto 207/2005 a qual apresentou o maior distanciamento das médias com intervalo entre 0,08% e 0,15%, aproximadamente. O aumento do distanciamento na cena 207/2005 é justificável uma vez que há presença de nuvens.

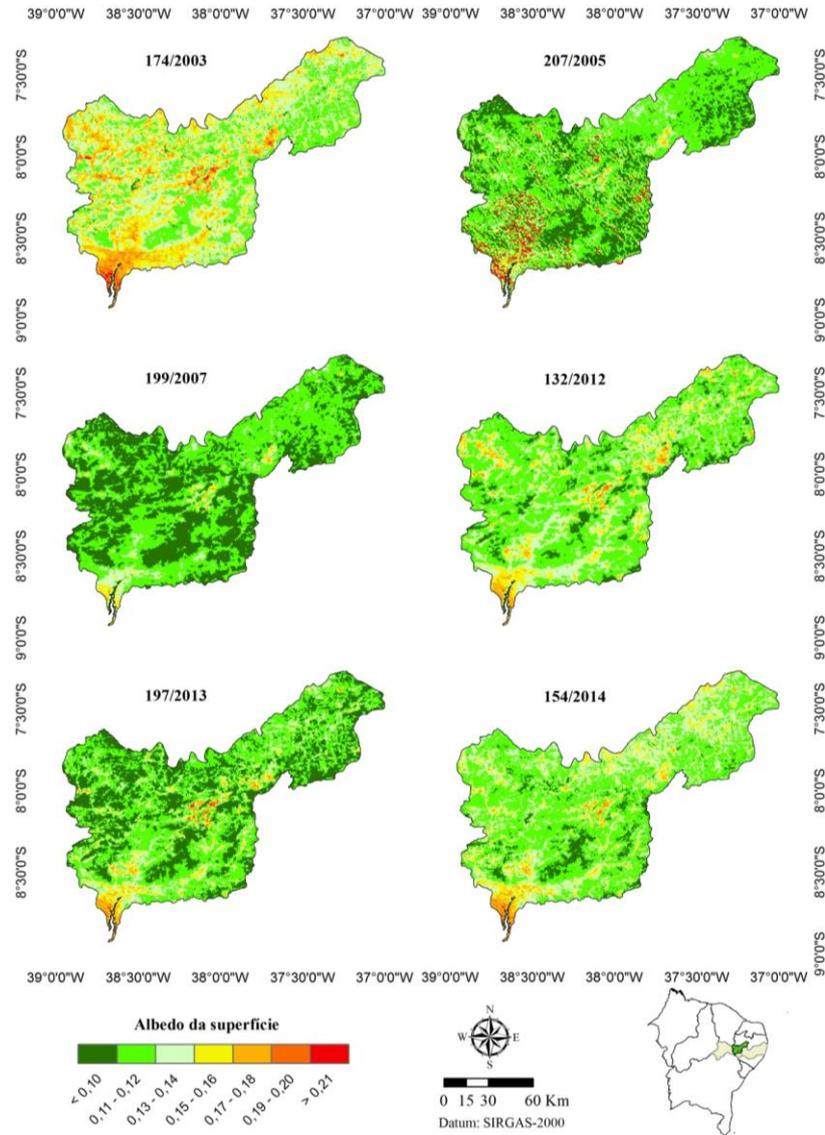
Figura 1: Gráfico dos valores médios e desvio padrão do albedo da superfície em 174/2003, 207/2005, 199/2007, 132/2012, 197/2013 e 154/2014



Na Figura 2 são representadas as cartas do albedo da superfície na bacia hidrográfica do rio Pajeú nas datas 174/2003, 207/2005, 199/2007, 132/2012, 197/2013 e 154/2014. Em quase todas as cenas analisadas predominaram as áreas com tonalidades em verdes, com albedo

inferior a 0,15%, enquanto as áreas mais avermelhadas entre 0,17 e 0,21%, com exceção da cena 207/2005, a qual foi observada agrupamento de pixels em cor vermelha ($> 0,21$) referente à presença de nuvens.

Figura 2: Carta temática da distribuição espacial do albedo da superfície nas datas 174/2003, 207/2005, 199/2007, 132/2012, 197/2013 e 154/2014



Destaca-se a da cena 175/2003, na qual foram constatados 32,8% entre os tons amarelo avermelhado (intervalo de 0,15 a 0,21), sendo a área com maior gravidade a porção sul da bacia hidrográfica, principalmente nos municípios de Itacuruba, Floresta, Belém de São Francisco e Carnaubeira da Penha, fato que se repete nas outras imagens, onde há presença de solo exposto. As características do solo nessas áreas proporcionam alta refletividade e consequentemente maiores valores do albedo.

Estudos realizados por Bezerra *et al.* (2014) sobre os parâmetros biofísicos no Parque Nacional da Furna Feia (PNFF) e suas adjacências, região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, revelaram, de forma geral, as áreas com cobertura vegetal de Caatinga apresentando albedo no intervalo de 0,10 a 0,15. Esse intervalo também prevaleceu na vegetação de Caatinga na bacia hidrográfica do rio Trussu em pesquisa sobre a sazonalidade de variáveis biofísicas realizada por Rodrigues *et al.* (2009), corroborando com valores similares aos obtidos no presente estudo. Áreas com predominância de vegetação rasteira e solo exposto apresentaram valores de albedo nas classes com intervalo entre 0,15 – 0,18 e superior a 0,19, respectivamente. Índices compatíveis com os trabalhos realizados por Bezerra *et al.* (2014), Rodrigues *et al.* (2009), Santos *et al.* (2014) e Silva; Silva; Silva (2014).

A Tabela 3 apresenta a distribuição percentual de pixels em cada classe de albedo da superfície, em que se evidencia a classe entre os intervalos 0,11 – 0,12 por apresentar maior distribuição espacial nas cenas analisadas. A cena 199/2007 apresentou o maior percentual entre os intervalos avaliados (49,7%), já na classe >0,21 o produto 207/2005 revelou-se o mais expressivo com 3,5%. Ainda no produto 207/2005 foi constatado os maiores valores no desvio padrão (0,035) e coeficiente de variação (0,30), porém foi em 174/2003 que deteve o maior valor médio (0,14). O menor coeficiente de variação (0,17) foi observado na cena 154/2014, o que confirmou maior homogeneidade do albedo; devido a maior cobertura vegetal na área.

Tabela 3: Distribuição percentual das classes de albedo da superfície na bacia hidrográfica do rio Pajeú para as datas em análise

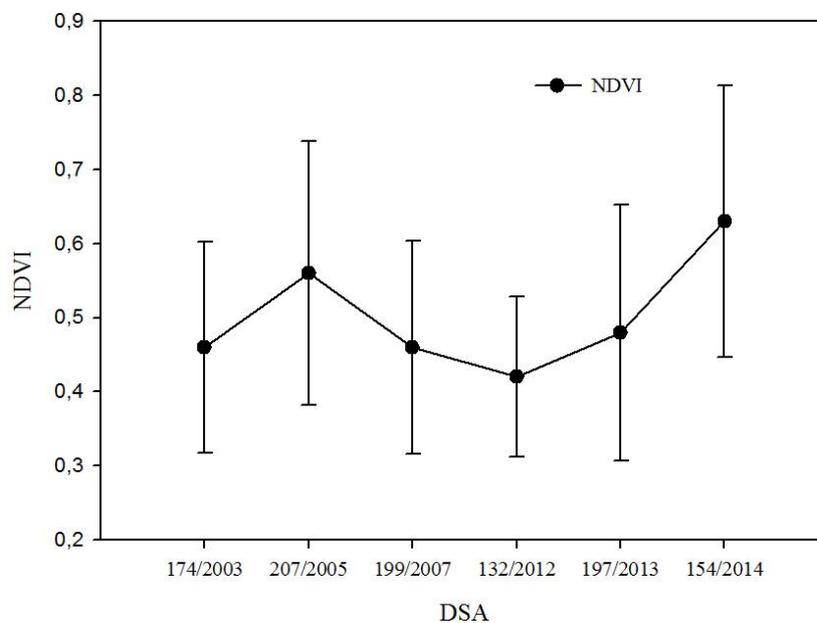
| Albedo da superfície (%) | 174/2003 | 207/2005 | 199/2007 | 132/2012 | 197/2013 | 154/2014 |
|--------------------------|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Classes | Distribuição percentual | | | | | |
| < 0,10 | 3,5 | 40,7 | 49,7 | 20,9 | 41,7 | 14,0 |
| 0,11 – 0,12 | 27,5 | 35,0 | 34,0 | 40,4 | 32,1 | 43,2 |
| 0,13 – 0,14 | 36,2 | 12,0 | 11,8 | 25,3 | 16,2 | 29,6 |
| 0,15 – 0,16 | 19,1 | 4,7 | 3,4 | 9,5 | 6,0 | 8,8 |
| 0,17 – 0,18 | 8,3 | 2,5 | 0,9 | 2,8 | 2,4 | 2,8 |
| 0,19 – 0,20 | 3,5 | 1,6 | 0,1 | 1,0 | 1,2 | 1,2 |
| > 0,21 | 1,9 | 3,5 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0,4 |
| Valor médio | 0,14 | 0,12 | 0,11 | 0,12 | 0,11 | 0,12 |
| Desvio-padrão | 0,026 | 0,035 | 0,021 | 0,023 | 0,025 | 0,022 |
| Coeficiente de variação | 0,19 | 0,30 | 0,19 | 0,19 | 0,22 | 0,17 |

O gráfico dos valores médios e desvio padrão do NDVI (Figura 3) apresentou uma grande variação entre os valores médios das cenas (0,21), destacando 132/2012 com o menor valor (0,42) e 154/2014 com o maior valor (0,63) entre os períodos analisados. O mencionado gráfico ainda revela que o desvio padrão foi alto em todas as cenas, sobressaindo 154/2014

com o maior desvio (0,36), intervalos aproximadamente entre 0,81 e 0,45; e 132/2012 com o menor (0,21), intervalos entre 0,52 e 0,31 aproximadamente.

O maior desvio padrão em 154/2014 se justifica devido o comportamento distinto da precipitação (chove mais no centro norte do que o sul) e da cobertura e uso do solo na bacia hidrográfica. Nas áreas onde há o maior índice de precipitação tem-se altos valores de NDVI, enquanto nas áreas onde a precipitação apresenta-se reduzida reflete em baixos valores do NDVI e alto desvio padrão. Em 132/2012 foi o segundo ano com menor precipitação (207 mm/ano) da série histórica de 102 anos (1912 – 2012), atingindo um Índice de Anomalia de Chuva negativo em torno de -3,26, segundo Ribeiro; Nóbrega; Mota-Filho (2015), o que proporcionou uma pequena quantidade de biomassa na área.

Figura 3: Gráfico dos valores médios e desvio padrão do NDVI em 174/2003, 207/2005, 199/2007, 132/2012, 197/2013 e 154/2014

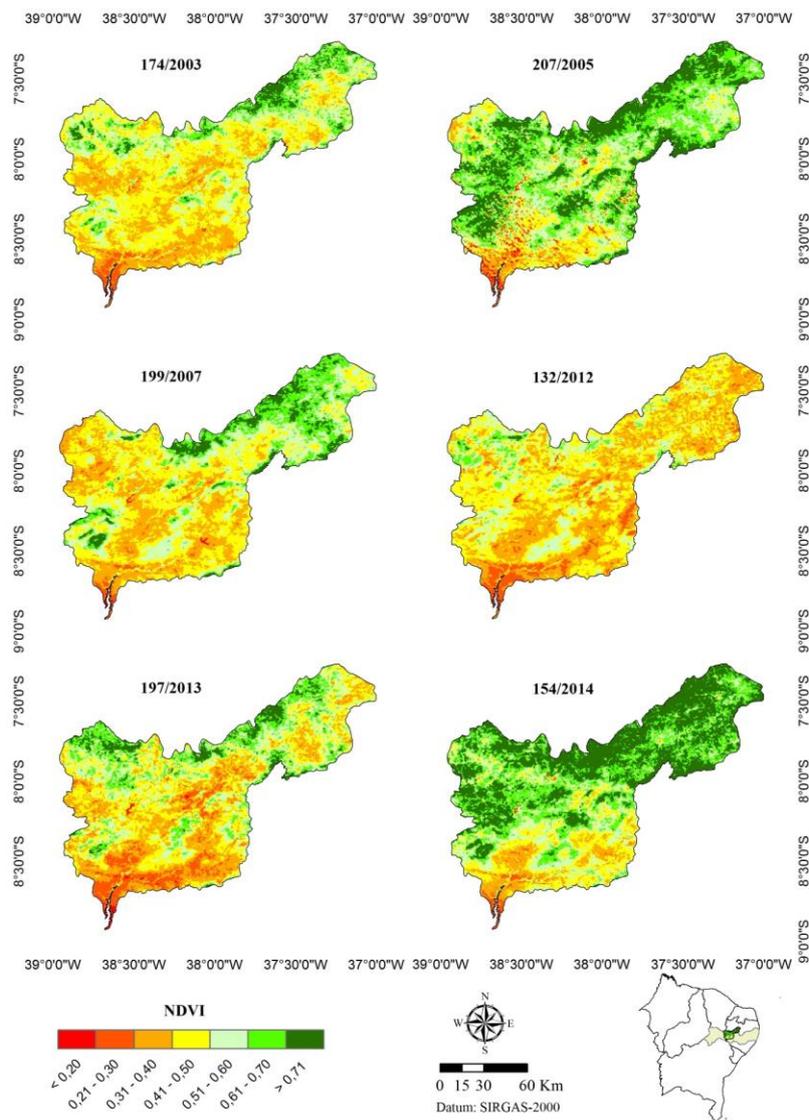


A variação espacial do NDVI da bacia hidrográfica pesquisada entre as imagens estudadas (Figura 4) indica que a vegetação é bastante resiliente, uma vez que eventos chuvosos com magnitudes que possibilitaram condições favoráveis apresentou alto potencial de recuperação da vegetação e ao desenvolvimento de biomassa da Caatinga.

No que tange a análise do NDVI, observou-se que os valores inferiores a 0,50, simulados nas cores vermelho, laranja e amarelo, representam solo exposto, vegetação rasteira bastante esparsada e áreas cobertas por vegetações caducifólias ralas que não se mantêm verde na estação seca, respectivamente, exceto na cena 207/2005 na qual a presença de nuvens na porção sul influenciou o NDVI atingindo índices

inferiores a 0,20. Enquanto as tonalidades de cor verde, faixas superiores a 0,51, representam áreas com maior vigor vegetativo, sendo mais pujante à medida que o verde fica mais escuro.

Figura 4: Carta temática da distribuição espacial do NDVI nas datas 174/2003, 207/2005, 199/2007, 132/2012, 197/2013 e 154/2014



Detectou-se que áreas de solo exposto, vegetação esparsa e caducifólias ralas predominam na bacia hidrográfica nas cenas 174/2003, 199/2007, 132/2012 e 197/2013, e na porção centro-sul em todas as imagens analisadas, possibilitando identificar as áreas submetidas a processo de degradação ambiental. Destaca-se 132/2012 em que perda de cobertura vegetal é devido à escassez das chuvas, enquanto o alto potencial de recuperação da vegetação nas cartas 207/2005 e 154/2014 está relacionada a ocorrência do evento chuvoso.

Os resultados encontrados nesta pesquisa foram condizentes com os valores encontrados na literatura para áreas de Caatinga (BEZERRA *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2014; e SILVA; SILVA; SILVA, 2014).

Além desses autores, destaca-se Albuquerque *et al.* (2014) em suas análises sobre o comportamento do NDVI e NDWI sob diferentes intensidades pluviométricas em Sousa–PB, onde constataram que o NDVI apresentou valores variando entre 0,01 a 0,29 em áreas de solo exposto e vegetação esparsa; enquanto os intervalos entre 0,3 e 0,5 representam vegetação menos densa; e os maiores que 0,5 indicam que a vegetação apresenta um bom estado fenológico, sendo a vegetação densa representada pelo NDVI superior a 0,7.

Rêgo *et al.* (2012) analisaram comparativamente os índices de vegetação NDVI e SAVI em São Domingos do Cariri–PB onde puderam identificar o crescimento de áreas com nível de degradação muito grave na região norte do mencionado município, onde puderam observar a intensificação do processo de desertificação no decorrer dos anos devido alguns agentes como grandes períodos de estiagem e das atividades humanas.

A distribuição percentual de pixels em cada classe de NDVI é representada pela Tabela 4, na qual se destaca o intervalo 0,41 – 0,50 com a maior representatividade espacial entre as datas. A maior magnitude entre os intervalos avaliados foi em 132/2012 (34,8%), enquanto nas classes < 0,20 e > 0,71 as maiores grandezas foram 4,3 e 31,9% nas cenas 207/2005 e 154/2014, respectivamente. Nessa última cena (154/2014) foram verificadas as máximas no valor médio (0,63) e no desvio padrão (0,183), enquanto o coeficiente de variação foi maior na data 197/2013 com 0,36 e menor em 132/2012 (0,26), caracterizando-se a forte homogeneidade do NDVI, como pode ser observado na Figura 9.

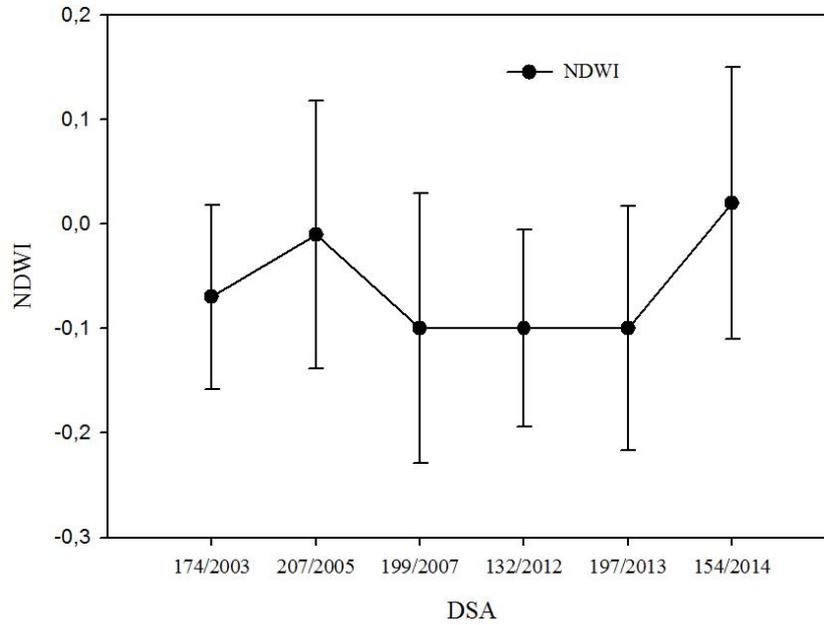
Tabela 4: Distribuição percentual das classes de NDVI na bacia hidrográfica do rio Pajeú para as datas em análise

| NDVI | 174/2003 | 207/2005 | 199/2007 | 132/2012 | 197/2013 | 154/2014 |
|-------------------------|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Classes | Distribuição percentual | | | | | |
| < 0,20 | 1,5 | 4,3 | 1,1 | 1,1 | 2,7 | 1,1 |
| 0,21 – 0,30 | 6,1 | 5,3 | 4,2 | 9,1 | 9,3 | 3,1 |
| 0,31 – 0,40 | 22,6 | 8,7 | 23,0 | 34,8 | 20,2 | 7,7 |
| 0,41 – 0,50 | 33,8 | 18,9 | 34,3 | 37,1 | 23,9 | 14,5 |
| 0,51 – 0,60 | 21,9 | 23,3 | 19,3 | 15,0 | 20,9 | 18,6 |
| 0,61 – 0,70 | 10,6 | 21,8 | 10,9 | 2,7 | 15,2 | 23,1 |
| > 0,71 | 3,5 | 17,7 | 7,2 | 0,2 | 7,8 | 31,9 |
| Valor médio | 0,46 | 0,56 | 0,46 | 0,42 | 0,48 | 0,63 |
| Desvio-padrão | 0,142 | 0,178 | 0,144 | 0,108 | 0,173 | 0,183 |
| Coeficiente de variação | 0,31 | 0,32 | 0,31 | 0,26 | 0,36 | 0,29 |

A Figura 5 destaca o gráfico dos valores médios e desvio padrão do NDWI, em que foi constatada pequena variação entre os valores médios das cenas analisadas, destacando-se 154/2014 com o maior valor médio (0,02), além do maior desvio padrão com 0,26 (intervalo entre -0,11 e 0,15). A menor média ficou com as cenas 199/2007, 132/2012 e 197/2013, contudo

o menor desvio padrão ficou com 174/2003 com 0,16 (intervalo entre -0,15 e 0,01), a qual obteve um valor médio de -0,07. Esses valores baixíssimos são explicados pela escassez hídrica e pela alta evaporação e evapotranspiração da região pesquisada.

Figura 5: Gráfico dos valores médios e desvio padrão do NDWI em 174/2003, 207/2005, 199/2007, 132/2012, 197/2013 e 154/2014



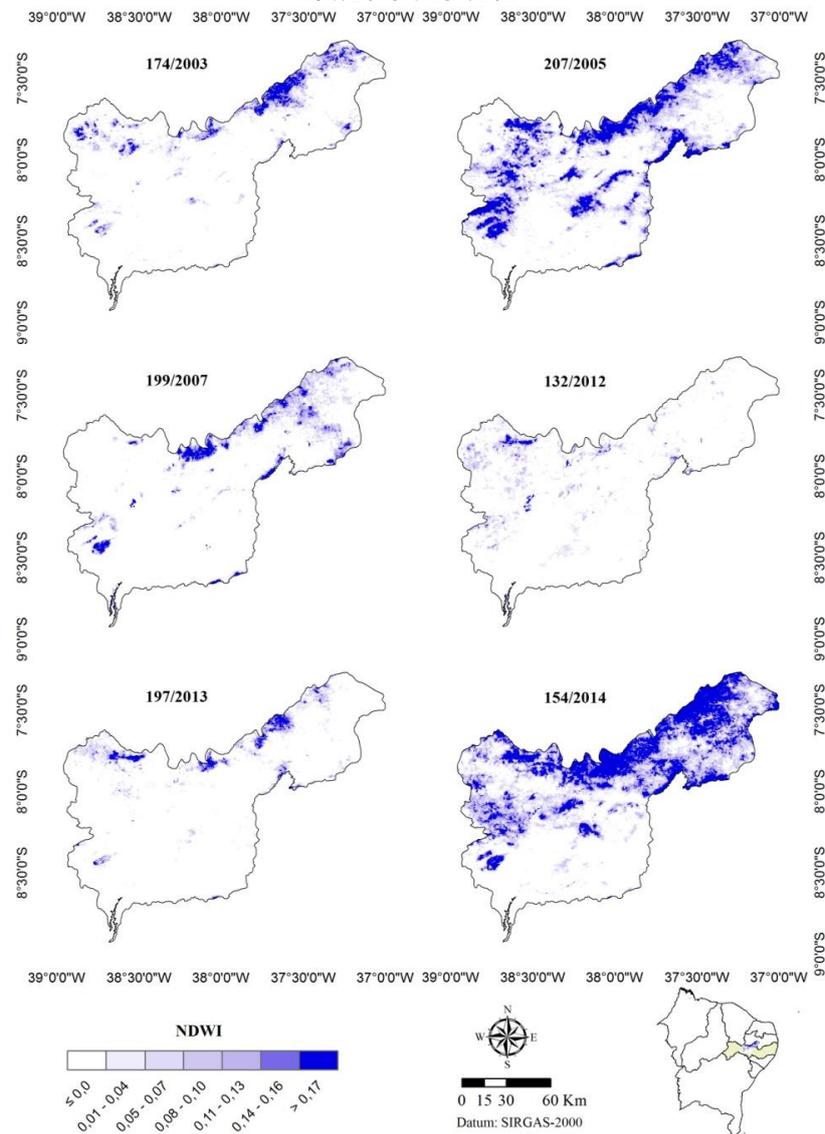
As cartas temáticas do NDWI das datas 174/2003, 207/2005, 199/2007, 132/2012, 197/2013 e 154/2014 da área investigada estão representadas Figura 6, na qual se verifica os baixos índices de umidade, com predominância de valores iguais ou inferiores a zero (cor branca), em todas as cenas analisadas. Os valores negativos do NDWI são caracterizados por apresentar uma vegetação com grande quantidade de folhas e/ou galhos secos, sendo relacionado à quantidade de água por unidade de área na vegetação (GAO, 1996).

Esses índices negativos são compatíveis com a pesquisa realizada por Leivas *et al.* (2013), na qual realizaram o monitoramento da seca de 2011 e 2012 a partir do NDWI e NDVI no Recôncavo Baiano. Albuquerque *et al.* (2014) também evidencia grande distribuição de valores negativos de NDWI no município de Sousa–PB onde o valor médio foi de -0,16.

As áreas que apresentaram maior umidade foram a norte e nordeste, principalmente nas cenas 207/2005 e 154/2014, nas quais atingiram índices superiores a 0,14, com tons de azul escuro. Já a porção sul revelou os valores extremamente baixos de umidade, tonalidades de azul claro a branco. Essa configuração da umidade na bacia hidrográfica (norte mais úmido e sul mais seco) é constatada por meio dos gráficos das médias das precipitações das estações meteorológicas examinadas nas

Figuras 3, 4 e 5. Destaca-se 154/2014 como a mais úmida e 132/2012 como a mais seca. Nesse último, observa-se a ocorrência de anomalias da precipitação em relação à média, classificando o período extremamente seco em toda a bacia hidrográfica do rio Pajeú (RIBEIRO; NÓBREGA; MOTA FILHO, 2015), bem como em grande parte de Pernambuco.

Figura 6: Carta temática da distribuição espacial do NDWI nas datas 174/2003, 207/2005, 199/2007, 132/2012, 197/2013 e 154/2014



Pode-se observar a correlação entre o NDVI e NDWI (Figuras 4 e 6, respectivamente), onde há a maior distribuição espacial de áreas com elevado índice de vegetação, também existe uma maior distribuição espacial de áreas com elevado índice de umidade; podendo assegurar que houve nas referidas áreas uma maior distribuição espacial da chuva. O mesmo ocorre com o inverso, ou seja, em zonas onde predominam a vegetação esparsa característica da região

semiárida, a cobertura vegetal baixa apresenta índices baixos de umidade, consequentemente, ocorreu nessa área menores precipitações pluviométricas.

A Tabela 5 apresenta a porcentagem de pixels em cada classe do NDWI. Pode-se observar que na classe $< 0,0$ apresenta a maior distribuição espacial de todas as cenas, isso por se tratar de um ambiente semiárido, destacando a data de 132/2012 com 90,7%, explicável por ser um ano de seca severa. Evidencia-se as cenas 207/2005 e 154/2014 que apresentaram maiores intensidades no intervalo $> 0,17$ (9,4 e 16%, respectivamente), principalmente no norte e nordeste por serem áreas mais úmidas, além de expressivo valor médio (-0,17 e -0,13, respectivamente). O desvio padrão foi mais significativo em 174/2003 (0,035) e o menor coeficiente de variação com o ano 132/2012 (-0,35) por apresentar rigorosa baixa umidade.

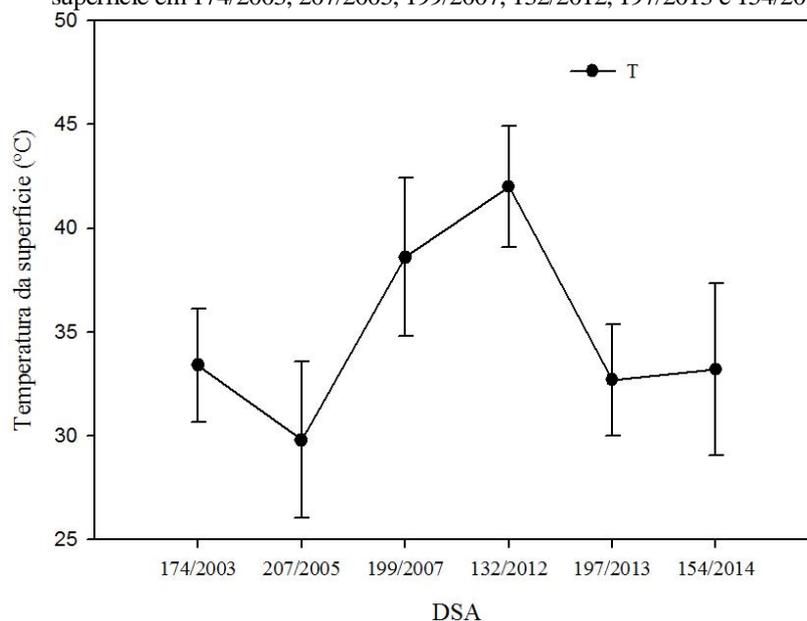
Tabela 5: Distribuição percentual das classes de NDWI na bacia hidrográfica do rio Pajeú para as datas em análise

| NDWI | 174/2003 | 207/2005 | 199/2007 | 132/2012 | 197/2013 | 154/2014 |
|-------------------------|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Classes | Distribuição percentual | | | | | |
| $< 0,0$ | 85,2 | 60,1 | 83,6 | 90,7 | 84,1 | 50,2 |
| 0,01 – 0,04 | 5,8 | 8,8 | 4,5 | 5,1 | 5,5 | 8,5 |
| 0,05 – 0,07 | 3,0 | 6,2 | 2,6 | 2,0 | 3,0 | 6,4 |
| 0,08 – 0,10 | 2,1 | 5,8 | 2,1 | 1,0 | 2,2 | 6,5 |
| 0,11 – 0,13 | 1,5 | 5,3 | 1,8 | 0,5 | 1,7 | 6,4 |
| 0,14 – 0,16 | 1,1 | 4,4 | 1,5 | 0,3 | 1,3 | 6,0 |
| $> 0,17$ | 1,3 | 9,4 | 3,9 | 0,4 | 2,2 | 16,0 |
| Valor médio | -0,17 | -0,17 | -0,23 | -0,20 | -0,22 | -0,13 |
| Desvio-padrão | 0,035 | 0,065 | 0,074 | 0,071 | 0,046 | 0,046 |
| Coeficiente de variação | -0,21 | -0,40 | -0,32 | -0,35 | -0,21 | -0,34 |

O gráfico dos valores médios e desvio padrão da temperatura de superfície (Figura 7) apresenta valores médios do satélite Terra/MOD (174/2003, 207/2005, 197/2013 e 154/2014) e Aqua/MYD (199/2007 e 132/2012). No primeiro satélite destacam-se 174/2003 com o maior valor médio (33,4°C), 207/2005 com o menor valor médio (29,8°C) e 154/2014 por possuiu maior amplitude com 8,3°C (variação entre 28,9 e 37,2°C), quando comparada com todas as outras imagens. No satélite Aqua/MYD a cena 132/2012 deteve o maior valor médio (42°C) e 199/2007 a segunda maior amplitude com 7,6°C (variação entre 34,7 e 42,3°C) de todas as outras cenas.

As cenas 174/2003, 197/2013 e 154/2014 revelaram elevadas amplitudes térmicas. Amplitudes intensificadas pela baixa quantidade de umidade atmosférica, pelo sistema de circulação do ar e, principalmente, pelo uso e cobertura do solo. Percebe-se que nos anos de 2007 e 2012 a seca severa e o horário da passagem do satélite contribuíram na homogeneização dos valores.

Figura 7: Gráfico dos valores médios e desvio padrão da temperatura da superfície em 174/2003, 207/2005, 199/2007, 132/2012, 197/2013 e 154/2014

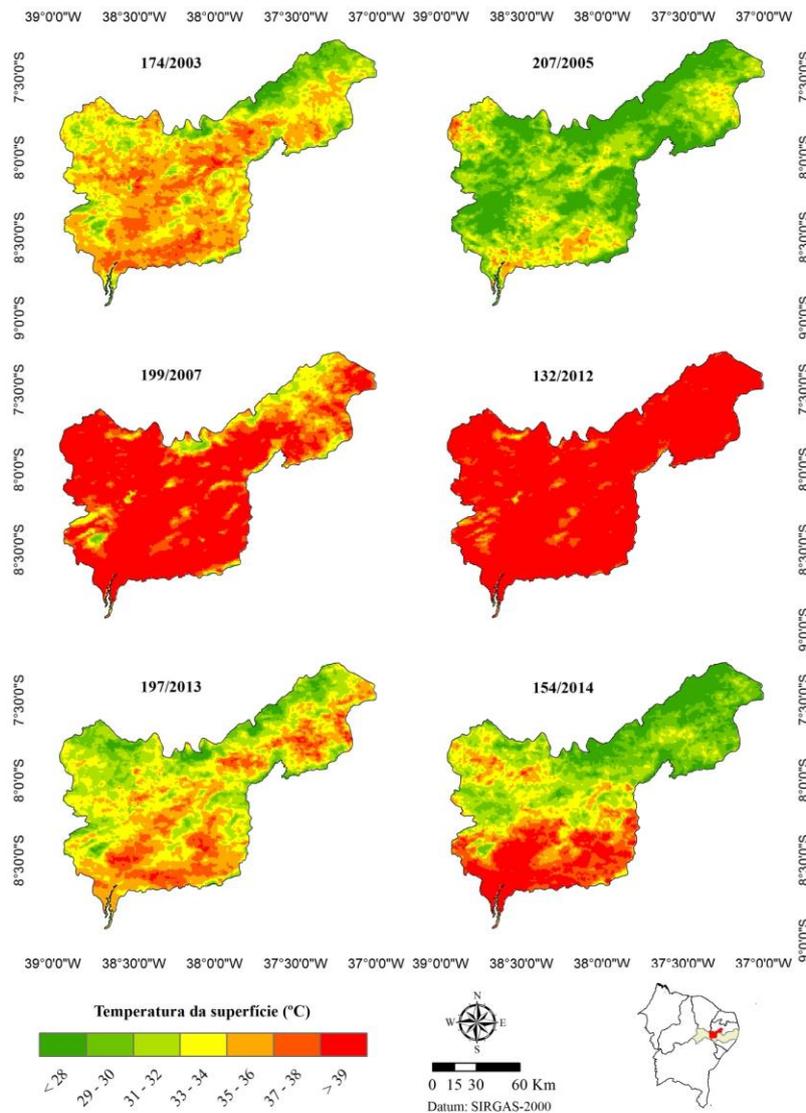


A Figura 8 apresenta variação espacial da temperatura da superfície da bacia hidrográfica para os momentos estudados. Observa-se que as áreas na cor amarela são de temperaturas intermediárias (33 – 34°C), levando em consideração a média de 33,5°C; as temperaturas mais amenas (< 32°C) nas tonalidades da cor verde, em destaque a carta 207/2005 a qual deteve a maior cobertura nessas temperaturas e a de 174/2003 por apresentar a menor temperatura com 17,9 °C; e as temperaturas mais elevadas (> 35°C) na cor laranja e nas tonalidades do vermelho, com ênfase a cena 132/2012 que atingiu picos de 50,7°C.

A diferença de temperatura da superfície se dá pela função das propriedades físico-químicas dos corpos. De modo geral, o comportamento térmico diferenciado da superfície pode ser influenciado pela quantidade de radiação solar global incidente, pela temperatura do ar, pela distribuição da cobertura vegetal, pelo regime de precipitação, pelas condições hídricas e pelas mudanças no ambiente pelas intervenções antrópicas (CUNHA *et al.*, 2012; BEZERRA *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2014).

Assim, ressalta-se que 199/2007 e 132/2012 as temperaturas apresentaram-se com valores superiores as outras datas analisadas, isso porque essas cenas são do satélite Aqua/MYD, o qual tem seu horário de passagem às 13:18 horas. Conforme Moreira (2009) entre às 12 e 14 horas ocorre os maiores picos de temperaturas na superfície. Enquanto as cenas 174/2003, 207/2005, 197/2013 e 154/2014 são produtos do satélite Terra/MOD, o qual tem horário de passagem às 10:36 horas.

Figura 8: Carta temática da distribuição espacial das temperaturas da superfície nas datas 174/2003, 207/2005, 199/2007, 132/2012, 197/2013 e 154/2014



Nas cartas observa-se que há uma diminuição das temperaturas da superfície de 174/2003 para 207/2005, enquanto que de 197/2013 para 154/2014 as diferenças ficam mais discrepantes, isto é, onde as temperaturas são altas ($> 35^{\circ}\text{C}$) e baixas ($< 32^{\circ}\text{C}$) em 197/2013, elas ficam mais intensas e com maior distribuição espacial em 154/2014, principalmente na porção sul e nordeste da área analisada. Nas cenas 199/2007 e 132/2012 as temperaturas superiores a 37°C incidem em quase toda a bacia hidrográfica, contudo se pode observar a influência da cobertura vegetal na diminuição das temperaturas em alguns espaços da cena 199/2007.

Com a análise das imagens foi possível verificar que as áreas com vegetação rasteira e solos expostos apresentam temperaturas mais elevadas que áreas com boa cobertura vegetal,

por exemplo, as cenas 207/2005 e 154/2014 das Figuras 9 e 19, constatações também verificadas nos estudos de Cunha *et al.* (2012), Giongo; Vettorazzi (2014), Santos *et al.* (2014), Santos; Santos; Bezerra (2014). Identificou-se com as cartas da temperatura da superfície que parte sul da bacia hidrográfica do rio Pajeú é a mais quente a parte nordeste fato também observado por Matos; Candeias; Tavares Júnior (2013). Dessa forma, forma pode-se afirmar que a maior presença de vegetação contribui para minimizar a temperatura e conservar a umidade do solo. Todavia, áreas afetadas por processos de degradação e desertificação contribuem para o aumento da liberação de calor sensível para a atmosfera.

No tocante à distribuição percentual de pixels em cada classe da temperatura da superfície no período estudado (Tabela 6) foi constatado que a faixa $> 39^{\circ}\text{C}$ obteve a maior distribuição espacial. Contudo, destaca-se que essa distribuição foi influenciada pelas cenas 199/2007 (52,8%) e 132/2012 (85,8%) do satélite Aqua/MYD, horário de passagem às 13:18 horas, detendo valores médios de $38,6$ e 42°C , respectivamente.

Tabela 6: Distribuição percentual das classes da temperatura da superfície na bacia hidrográfica do rio Pajeú para as datas em análise

| Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) Classes | 174/2003 | 207/2005 | 199/2007 | 132/2012 | 197/2013 | 154/2014 |
|---|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Distribuição percentual | | | | | |
| < 28 | 6,2 | 40,0 | 1,7 | 0,3 | 8,1 | 17,8 |
| 29 – 30 | 10,6 | 22,2 | 2,8 | 0,2 | 17,6 | 19,1 |
| 31 – 32 | 20,6 | 18,4 | 4,5 | 0,2 | 27,4 | 15,7 |
| 33 – 34 | 31,8 | 11,0 | 7,6 | 0,4 | 24,9 | 12,1 |
| 35 – 36 | 25,7 | 5,5 | 12,3 | 3,0 | 16,8 | 10,9 |
| 37 – 38 | 4,8 | 2,4 | 18,3 | 10,3 | 4,7 | 12,6 |
| > 39 | 0,3 | 0,5 | 52,8 | 85,6 | 0,5 | 11,8 |
| Valor médio | 33,4 | 29,8 | 38,6 | 42,0 | 32,7 | 33,2 |
| Desvio-padrão | 2,720 | 3,753 | 3,801 | 2,936 | 2,679 | 4,156 |
| Coefficiente de variação | 0,08 | 0,13 | 0,10 | 0,07 | 0,08 | 0,13 |

Ao considerar apenas os produtos do satélite Terra/MOD (174/2003, 207/2005, 197/2013 e 154/2014), o horário de passagem às 10:36 horas, a classe que se destacou com a maior espacialidade foi a de $31 - 32^{\circ}\text{C}$, sendo o de maior representatividade a cena 207/2005 com 40% no intervalo $< 28^{\circ}\text{C}$. Nesses produtos o maior valor médio foi de $33,4^{\circ}\text{C}$ (174/2003). O desvio padrão mais expressivo foi na data 154/2014 com 4,156. O coeficiente de variação ficou com a máxima nas cenas 207/2005 e 154/2014 com 0,13; enquanto a menor variação em 132/2012 por apresentar temperaturas acima de 39°C em quase toda a bacia hidrográfica (Figura 19).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados encontrados com os parâmetros biofísicos analisados, utilizando alguns componentes do algoritmo SEBAL e produtos MODIS – Terra e Aqua, na presente pesquisa possibilitaram conclusões a cerca das condições ambientais da bacia hidrográfica do rio Pajeú.

Assim, pode-se afirmar o albedo de superfície mostra forte correlação com a cobertura do solo, apresentando os maiores valores nas áreas com solo exposto e menores nas feições com cobertura vegetal. Nas imagens examinadas, o NDVI expôs a resiliência da Caatinga com o alto potencial de recuperação e desenvolvimento de biomassa em condições favoráveis de precipitação. Com relação ao NDWI os valores negativos se devem a caracterização de uma vegetação com grande quantidade de folhas e/ou galhos secos, além da escassez hídrica e pela alta evaporação e evapotranspiração da região pesquisada.

A distribuição espacial da cobertura vegetal influencia na distribuição espacial da temperatura da superfície, pois se constatou que as áreas com vegetação rasteira e solos expostos apresentam temperaturas mais elevadas que áreas com boa cobertura vegetal.

As estimativas averiguadas permitiram inferir que a porção centro-sul da bacia hidrográfica do rio Pajeú ocorre graves processos de degradação ambiental com altos riscos de desertificação, principalmente na foz do rio.

Conclui-se também que os parâmetros biofísicos avaliados pelo algoritmo SEBAL são eficazes e eficientes na compreensão da dinâmica dos padrões das mudanças nos ambientes semiáridos como o da referida bacia hidrográfica. Diante do exposto, recomenda-se o monitoramento da dinâmica do uso e ocupação do solo da referida área através de sensoriamento remoto orbital, a continuidade da avaliação desses parâmetros biofísicos, bem como a utilização de outras variáveis e com o emprego de outros algoritmos e produtos para confrontação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e a o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE) pelo incentivo a pesquisa acadêmica.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, E. M.; *et al.* Análise do comportamento do NDVI e NDWI sob diferentes intensidades pluviométricas no município de Sousa-PB. *Revista Estudos Geoambientais*, Rio Tinto, n. 01, v. 01; Jan-Abr, 2014.

ALLEN, R. G.; *et al.* Sebal - surface energy balance algorithms for land. Advance training and users manual – Idaho implementation. Moscow: Idaho Department of Water Resources, 2002. 98p.

ANDRADE, R. G.; BERNARDI, A. C. C.; GREGO, C. R. Estimativa de parâmetros biofísicos em plantio de sorgo com aplicação de técnicas de sensoriamento remoto. *CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, Anais... Belém, PA: SBMET, 2010.

ANDRADE, R. G.; *et al.* Mapeamento de parâmetros biofísicos e da evapotranspiração no Pantanal usando técnicas de sensoriamento remoto. *Anais 2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal*, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 695 – 704, Corumbá, 2009.

ARROYO, A. J. B. Determinación de parámetros biofísicos de la cubierta vegetal mediante inversión de modelos de transferencia radiativa. Tese (Doctorado en Ciencias). Universidad de Valladolid, Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica, Valladolid, 2007.

BASTIAANSEN, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate. PhD. Dis., CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, the Netherlands, 1995, 272 p.

BEZERRA, J. M.; *et al.* Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v. 18, n. 1, p. 73 – 84, 2014.

CARDOZO, F. S.; *et al.* Discriminação de áreas alagadas no Pantanal sulmatogrossense a partir de imagens orbitais. *Anais... 2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal*, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 99–106, 2009.

CHEN, D.; HUANG, J; JACKSON, T. J. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near-and short- wave infrared bands. *Remote Sensing of Environment*. v. 98, pg. 225 – 236, 2005.

COSTA FILHO, J. F. Avaliação dos componentes do balanço de energia e evapotranspiração em uma região semi-árida usando imagens orbitais Landsat-5 TM e Terra-Modis. 2005. 141f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais)-Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

COUTO JÚNIOR, A. F.; *et al.* Séries temporais de NDVI, EVI e NDWI do sensor Modis para caracterização fenológica do algodão. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 65/1, p. 199 – 210, 2013.

CUNHA, A. P. M. A.; *et al.* Impactos dos parâmetros biofísicos da vegetação derivados do sensor MODIS/TERRA nas simulações do balanço de energia em área de caatinga. VI Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, Ciência e Natura Especial, [Edição Especial – Micrometeorologia](#), p. 109 – 112, 2009.

CUNHA, J. E. B. L.; *et al.* Dinâmica da cobertura vegetal para a Bacia de São João do Rio do Peixe, PB, utilizando-se sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 5, p. 539 – 548, 2012.

GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; TISOT, D. A. Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brasil with EO-1 Hyperion Data. *Remote sensing of Environment*, 94, 523 – 534, 2005.

GAMARRA, N. L. R. Análise de albedo da superfície a partir de sensoriamento remoto: contribuições para estudos sobre ilha de calor urbano. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá – MG, 2012.

GAO, B. C. NDWI - A Normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, v. 58, p. 257 – 266, 1996.

GIONGO, P. R. Estimativa do balanço de radiação com técnicas de sensoriamento remoto e dados de superfície. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal Rural de Pernambuco. Departamento de Tecnologia Rural. Recife, 2008, 92 p.

GIONGO, P. R.; *et al.* Albedo à superfície a partir de imagens Landsat 5 em áreas de cana-de-açúcar e cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, p. 279 – 287, 2010.

GIONGO, P. R.; VETTORAZZI, C. A. Mapeamento de parâmetros biofísicos em bacia hidrográfica por meio de sensoriamento remoto. II Inovagri International Meeting, Fortaleza, 2014.

GUSMÃO, A. C. V. L.; *et al.* Obtenção do albedo e da temperatura da superfície através de imagens de satélite em bacia hidrográfica. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais..., Bento Gonçalves – RS, 2013.

IMMERZEEL, W. W.; GAUR, A.; SWART, S. J. Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment. *Agricultural Water Management*, V. 95, p. 11-24, 2008.

JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução: José Carlos Neves Epiphânio. Sao Jose dos Campos, SP: Parentese, 2009.

LEIVAS, J. F.; *et al.* Monitoramento da seca de 2011/12 a partir do NDWI e NDVI padronizado do SPOT-Vegetation. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Anais... Foz do Iguaçu, PR, Brasil, INPE, 2013.

LIRA, M. V. Obtenção de parâmetros biofísicos e evapotranspiração da cana-de-açúcar mediante imagens orbitais na região do sub médio São Francisco. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande – PB, 2008. 161 p.

LIU, W. T. H. Aplicações de sensoriamento remoto. Campo Grande, Ed. UNIDERP, 2006.

LIU, W. T. H., MING, T. C. Geração de mapas globais de parâmetros biofísicos a partir de imagens NOAA/AVHRR-GLASS. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 10, 1998, Brasília. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1998.

LOPES, H. L.; *et al.* Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças na cobertura e uso do solo em bacias hidrográficas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v. 14, n. 11, p. 1210 – 1219, 2010.

MOREIRA, E. B. M. Variação espacial e multitemporal das temperaturas da superfície na cidade do Recife. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CFCH. Recife, 2009. 98 p.

MOREIRA, M. A.; SHIMABUKURO, Y. E. Cálculo do índice de vegetação a partir do sensor AVHRR Capítulo 4, p. 80 – 101. In: Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N. FERREIRA, N. J. (Coord.). São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. Modis website. Disponível em: <<http://www.modis.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em: 19/11/2014.

OLIVEIRA, L. M. M. Estimativa da evapotranspiração real por sensoriamento remoto na Bacia do Rio Tapacurá-PE. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências. Recife, 2012.

OLIVEIRA, L. M. M.; *et al.* Análise quantitativa de parâmetros biofísicos de bacia hidrográfica obtidos por sensoriamento remoto. Pesq. agropec. bras., Brasília, v. 47, n. 9, p. 1209 – 1217, 2012.

OLIVEIRA, T. H.; *et al.* Índice de umidade (NDWI) e análise espaço-temporal do albedo da superfície da bacia hidrográfica do Rio Moxotó-PE. Revista Brasileira de Geografia Física, n. 3, p. 55 – 69. 2010.

PEÑUELAS, J.; *et al.* The reflectance at the 950 – 970 nm region as an indicator of plant water status. International Journal of Remote Sensing, v. 14, 1887 – 1905, 1993.

RAMOS, R. R. D.; *et al.* Determinação de variáveis biofísicas na bacia do rio Pajeú – Pernambuco, Brasil. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 2011.

RÊGO, S. C. A.; *et al.* Análise comparativa dos índices de vegetação NDVI e SAVI no município de São Domingos do Cariri–PB. Revista Geonorte, Edição Especial, v.2, n.4, p.1217 – 1229, 2012.

- RIBEIRO, E. P.; NÓBREGA, R. S.; F. O. MOTA FILHO. Spatiotemporal Rainfall Variability in the Pajeu' River Basin, Pernambuco, Brazil, *Journal of Environmental Hydrology*, Vol. 23, Paper 2, 2015.
- RODRIGUES, J. O.; *et al.* Sazonalidade de variáveis biofísicas em regiões semiáridas pelo emprego do sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 29, p. 452 – 465, 2009.
- ROSENDO, J. S.; ROSA, R. A utilização de sensores com resolução moderada (MODIS) no estudo da vegetação na Bacia do Rio Araguaari – MG. *Revista Sociedade & Natureza*, Uberlândia v.33, n.17, p. 91-104. 2005.
- ROUSE, J. W.; *et al.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: *Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Proceedings*. Washington, v.1, Sec. A, p. 309 – 317, 1973.
- SALLO, F. S.; *et al.* Estimativa de componentes do balanço de radiação em diferentes tipos de uso e cobertura do solo. *Rev. Ambient. Água*, v. 9 n. 2, Taubaté, apr./jun., 2014.
- SANTOS, E. G.; *et al.* Análise de parâmetros ambientais no núcleo de desertificação de Irauçuba - CE usando imagens de satélite. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 07, n. 05 (Número Especial – VIWMCRHPE), p. 915 – 926, 2014.
- SANTOS, E. G.; SANTOS, C. A.; BEZERRA, B. G. Analysis of Environmental Parameters in Gilbués – PI Using Satellite Images. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v. 04, p. 100-110, 2014.
- SANTOS, J. Y. G.; *et al.* Assessment of land use change on the streamflow using GIS, remote sensing and physically-based model. *IAHS-AISH Publication*, v. 368, p. 232 – 239, 2014.
- SECRETARIA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE (SECTMA-PE). Plano estadual de recursos hídricos do estado de Pernambuco. v.1, Pt. II e III. Recife, 1998.
- SHUAI, Y.; *et al.* An algorithm for the retrieval of 30-m snow-free albedo from Landsat surface reflectance and MODIS BRDF. *Sensing of Environment*, v. 115, p.2204 – 2216, 2011.
- SILVA, A. M.; SILVA, R. M.; SILVA, B. B. Estimativa de parâmetros biofísicos em diferentes tipos de uso e ocupação do solo no semiárido paraibano. XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia, V Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, XXV Expositiva, Anais... Gramado, RS, 2014.
- SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. de. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5 TM. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 13, p. 201 – 211, 2005.
- SILVA, N. D.; *et al.* Uso do NDVI como indicativo da mudança temporal da vegetação na sub bacia do rio Grande. XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA. Anais... Campo Grande – MS, 2014.

TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R. At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 13, p. 51 – 63, 2008.