



ISSN:1984-2295

# Revista Brasileira de Geografia Física



Homepage: [www.ufpe.br/rbgf](http://www.ufpe.br/rbgf)

## Sensoriamento remoto hyperspectral aplicado para análise dos indicadores de resiliência e suscetibilidade do bioma caatinga frente às mudanças climáticas

Viviane Pedrosa Gomes<sup>1</sup>, Josicléda Domiciano Galvêncio<sup>2</sup>, Magna Soelma Beserra Moura<sup>3</sup>, Pedro dos Santos Ferreira<sup>4</sup>, Yenê Medeiros Paz<sup>5</sup>, Rodrigo de Queiroga Miranda<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Mestranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente - Prodepa, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Autor correspondente: E-mail: [vivianegomesgeo@gmail.com](mailto:vivianegomesgeo@gmail.com), <sup>2</sup>Profa. Dra. Do Departamento de Ciências Geográficas, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, [josicleda@hotmail.com](mailto:josicleda@hotmail.com), <sup>3</sup>Pesquisadora da Embrapa Semiárido. E-mail [magna@cpsa.embrapa.br](mailto:magna@cpsa.embrapa.br), <sup>4</sup>Mestrando em Desenvolvimento e Meio Ambiente - Prodepa, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. E-mail: [pedro\\_spe@hotmail.com](mailto:pedro_spe@hotmail.com), <sup>5</sup>Doutoranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente - Prodepa, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. E-mail: [yenemedeiros@hotmail.com](mailto:yenemedeiros@hotmail.com) <sup>6</sup>Doutorando em Desenvolvimento e Meio Ambiente - Prodepa, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. E-mail: [rodrigo.qmiranda@gmail.com](mailto:rodrigo.qmiranda@gmail.com),

Artigo submetido em 20/07/2016 e aceite em 25/10/2016.

### RESUMO

A constante exploração da Caatinga para fins econômicos, pode ocasionar o agravamento do processo das mudanças climáticas. Diversos modelos climáticos aplicados para o Nordeste brasileiro indicam que a região deve ser uma das mais afetadas pelas alterações no clima. Os efeitos desse processo sobre a Caatinga ainda são incertos, sobretudo no que se refere ao funcionamento fisiológico da vegetação. Alguns estudos têm demonstrado ser possível obter a quantidade de carbono sequestrado da atmosfera através de estimativas da eficiência de uso da luz e componentes do balanço de energia. O objetivo deste estudo é caracterizar a resposta espectral da vegetação, em função do sequestro de carbono como indicadora de resiliência e suscetibilidade do bioma Caatinga frente às mudanças climáticas. Para esse trabalho foram medidos em campo, Índice de Área Foliar (IAF), medidas diretas de espectrorradiometria, temperatura do ar, do solo, da superfície da folha, umidade relativa do ar, clorofila A, B e Total. Através dos dados de espectrorradiometria foram gerados índices de vegetação, pigmentação e Assimilação líquida de carbono (NPP). Foram projetados cenários futuros das variáveis estimadas utilizando dados do modelo climático ETA, projetados até o ano de 2040. As variáveis projetadas indicaram uma tendência de aumento da temperatura, umidade e déficit de pressão de vapor favorecendo a assimilação de carbono pela vegetação. No entanto, o cenário projetado pelo modelo foi resultante de uma estimativa otimista, ou seja, as temperaturas médias globais para os anos analisados podem sofrer algum incremento e interferir o comportamento fisiológico das vegetações prejudicando a capacidade de resiliência.

Palavras-chave: Caatinga, mudanças climáticas, NPP, cenários, ETA.

### Hyperspectral remote sensing applied for analysis of the resilience indicators and biome caatinga susceptibility to climate change

### ABSTRACT

The constant degradation of the Caatinga for economic purposes, can cause the intensification of the process of climate change. Several climate models applied to the Brazilian Northeast indicate that the region should be one of the most affected by changes in climate. The effects of this process on Caatinga are still uncertain, especially with regard to the physiological functioning of the vegetation. Some studies have shown to be possible to obtain the amount of sequestered carbon from the atmosphere by estimating the light use efficiency and energy balance components. The goal of this study is to characterize the spectral response of the vegetation, depending on the carbon sequestration as an indicator of resilience and biome Caatinga susceptibility to climate change. For this study were measured in the field, leaf area index (LAI), direct measurements of spectroradiometry, air temperature, soil temperature and leaf surface temperature, relative humidity, chlorophyll A, B and Total. Through spectroradiometry data were generated vegetation indexes, pigmentation and Net Primary Productivity (NPP). Future scenarios of the variables were estimated using the climate model data ETA, designed until the year 2040. The variables designed indicated a trend of increasing temperature, humidity and vapor pressure deficit favoring carbon assimilation by vegetation. However, the scenario projected by the model was the result

of an optimistic estimate, in other words, global average temperatures for the years analyzed may experience some increase and interfering the physiological performance of the vegetations damaging resilience.

Keywords: Caatinga, climate change, NPP, scenarios, ETA.

## Introdução

A Caatinga é um bioma exclusivamente brasileiro e cobre grande parte do semiárido do nordestino, com área aproximada de 844.453 Km<sup>2</sup>, o que representa 9,92% do território nacional (IBGE, 2004). Com precipitações baixas e temperaturas elevadas durante o ano todo (Alves et al., 2009) a sazonalidade das chuvas é considerado um fator relevante nas variações de abundância das populações de plantas da caatinga e da distribuição das espécies (Andrade et al., 2009). Além da influência das chuvas, existe uma relação estreita e dinâmica entre vegetação e uso das terras (Souza e Menezes, 2015), mas a compreensão atual das mudanças de cobertura da terra ainda pode ser considerada com limitações devido a um conhecimento reduzido sobre as modificações históricas e condição atual da cobertura vegetal natural na área (Beuchle et al., 2015).

Assim como várias matas secas tropicais, a Caatinga tem sido explorada para diversos fins como atividade agrícola, pecuária extensiva e extrativismo (Moreira et al., 2006). Com relação às atividades extrativistas destaca-se a produção de lenha e carvão, que conforme salientou Ferraz et al. (2014) envolve corte de extensas áreas da caatinga e comprometimento da biodiversidade. A degradação ambiental e a desertificação de diversas áreas na Caatinga foram mencionadas no trabalho de Menezes et al. (2012), e dentre os processos antrópicos tem-se principalmente o desmatamento, geralmente associado à agricultura, e o manejo inadequado do solo, sobrepastoreio e extração de madeira.

Diversos trabalhos têm abordado acerca da degradação da caatinga como Costa et al. (2009), Alves et al. (2009), Souza e Menezes (2015) e como a desertificação agrava condições de fragilidades geocológicas e socioeconômicas (Trigueiro et al., 2009) é importante o desenvolvimento de estudos que contribuam para desenvolvimento de técnicas de monitoramento e preservação do bioma.

Outro agravante para a questão diz respeito às mudanças climáticas antropogênicas. Diversos modelos climáticos aplicados por Marengo (2006) para o Nordeste brasileiro indicam que a região deve ser uma das mais afetadas pelas alterações no clima. No que se refere a variáveis como precipitação e temperatura do ar, todos os modelos foram unânimes ao relatar um aquecimento

sistemático de todo território e redução dos índices pluviométricos.

Os efeitos das mudanças climáticas sobre a Caatinga ainda são incertos, sobretudo no que se refere ao funcionamento fisiológico da vegetação. Por outro lado, devido a suas funções adaptativas, como perda da folhagem para redução do estresse luminoso e perda de água por evapotranspiração, espera-se que o prolongamento das estações chuvosas no semiárido contribuam para que a vegetação demore ainda mais tempo para regenerar sua folhagem. Tal dinamismo implica na redução da sua capacidade de sequestrar e estocar carbono ao longo do ano, fator que potencializa os efeitos das alterações de clima.

Com relação ao estoque de carbono, Menezes et al. (2012) apontou que a média de carbono orgânico total no horizonte Ap é considerado baixo em relação a outros biomas do Brasil, indicando que a Caatinga é menos eficiente quanto a esse aspecto. Por outro lado, a extensão territorial do bioma o coloca em vantagem em relação a outros ecossistemas que, apesar de mais eficientes, possuem áreas bastante reduzidas. Um exemplo do exposto é o ecossistema de manguezal, que apesar de possuir um grande potencial na assimilação e estocagem de carbono, limita-se às partes do litoral brasileiro.

Diante das questões expostas, diversos pesquisadores alertam para a importância de se desenvolver estudos capazes de traçar um panorama sobre as implicações que as variações e mudanças climáticas podem produzir sobre a Caatinga. No trabalho de Althoff et al. (2016), por exemplo, verificou-se que, com base nas previsões climáticas do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), a biomassa da vegetação nativa da Caatinga e o estoque de carbono orgânico do solo seria reduzido ao longo deste século, com a taxas de 40% e 13%, respectivamente, isto para o estado atual da vegetação, ou seja, sem que se leve em consideração as futuras alterações no padrão de cobertura vegetal.

Por outro lado, um dos grandes desafios para a comunidade científica tem sido reunir uma gama de informações que possam auxiliar na avaliação dos efeitos das mudanças de clima sobre a Caatinga, assim como sua capacidade de resiliência.

Muitos estudos têm evidenciado que a matéria seca acumulada em dado bioma pode ser obtida em função da fração da radiação

fotossintética absorvida e a radiação solar incidente, acumulados em dado intervalo de tempo. Nesse sentido, alguns estudos têm demonstrado ser possível obter a quantidade de carbono sequestrado da atmosfera por meio de estimativas da eficiência de uso da luz e componentes do balanço de energia, seja a partir de dados medidos em campo e/ou com imagens orbitais (Namayanga, 2002; Bastianssen e Ali, 2003).

Diante dos fatos elencados, o presente estudo tem como objetivo central caracterizar a resposta espectral da vegetação, em função do sequestro de carbono, como indicadora de resiliência e suscetibilidade do bioma caatinga frente às mudanças climáticas.

## Material e métodos

### Caracterização da área de estudo

A área selecionada para o desenvolvimento do presente estudo está localizada em Petrolina (Figura 1), estado de Pernambuco, município conta com uma área de 4,562 km<sup>2</sup> e população total de 293,962. O ponto destacado na Figura corresponde

a uma área experimental da EMBRAPA semiárido, onde verifica-se a presença da vegetação de Caatinga preservada.

O clima predominante na região é o tropical semiárido, conforme classificação de Köppen. As chuvas são bastante escassas e concentram-se entre os meses de dezembro a abril, período em que são regidas principalmente pela atuação de sistemas atmosféricos dinâmicos, entre os quais, pode-se destacar a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a penetração de sistemas oriundos de latitudes médias austrais, Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) e a Oscilação de Madden-Julian (Lucena et al., 2011)

A vegetação predominante é do tipo xerófila, a qual é bem adaptada a dupla estacionalidade climática da região. Quanto aos solos, predominam na área os Argissolos Vermelho-Amarelo. Por se tratar em uma região semiárida, tendem a ser menos profundos e apresentam elevado teor de rocha devido a predominância do intemperismo físico na região (Calixto Júnior e Drumond, 2011b).

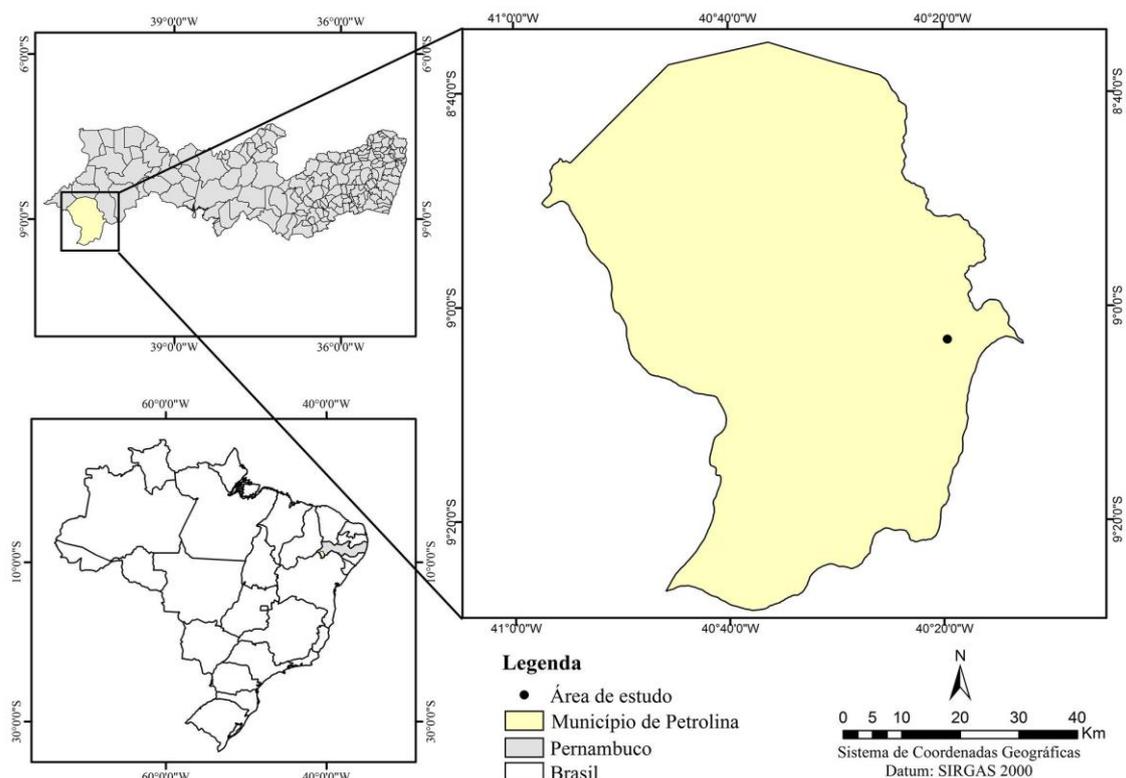


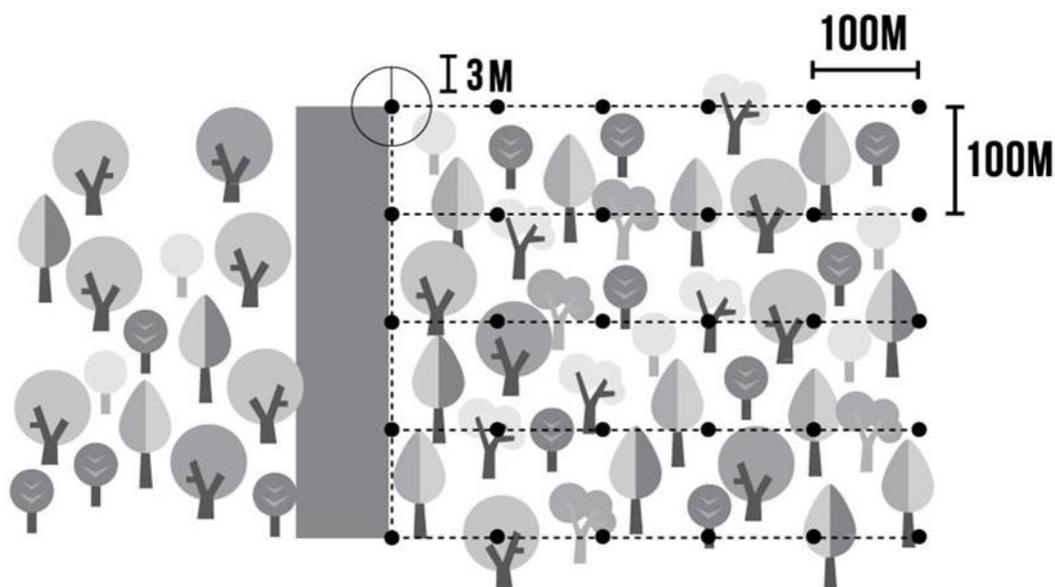
Figura 1. Mapa de Localização. Fonte: elaborado pelo autor a partir da base de dados do Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (ZAPE).

### Procedimentos metodológicos

Para levantamento dos dados em campo, delimitou-se uma área que possui 500x500 m, onde foram definidos e marcados 30 pontos equidistantes, distribuídos uniformemente a cada 100 m (Figura 2).

Os dados observados em campo foram medidos através de diferentes equipamentos. Para medição do Índice de Área Foliar (IAF) e a radiação fotossinteticamente ativa, empregou-se o AccuPAR LP-80. As medidas diretas de reflectância, transmitância e absorbância foram

realizadas com espectrorradiômetro, FieldSpec ASD. Quanto as medições indiretas, estas referem-se à concentração de pigmentos, teor de água e estrutura da planta. Os dados relativos ao teor de clorofila foram gerados com auxílio do ClorofiLOG Falker, enquanto a temperatura e umidade relativa do ar foram medidas com Termo-Higrômetro 7429 TFA INCOTERM. As medições de temperatura de superfície do solo, foram conduzidas por meio da Termômetro Digital Lcd Infravermelho Com Mira Laser -50° A 380° C.



A partir dos trabalhos de campo realizados em novembro de 2012 e abril de 2013, os dados obtidos foram consolidados com os índices de pigmento de vegetação e variáveis climáticas, foram eles: TA (Temperatura do ar); PRI (Photochemical Reflectance Index); e MCARI (Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index); OSAVI (Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index); TCARI (Transformed Chlorophyll Absorption Ratio Index); MTVI (Modified Triangular Vegetation Index); NDVI (Normalized Difference Vegetation Index); ChlA (Clorofila A), ChlB (Clorofila B) e Chl T (Clorofila total) obtidas pelo espectrorradiômetro; NPP (Assimilação Líquida de Carbono) ChlA; ChlB; Chl T. (Clorofila A e Clorofila B e Clorofila total) obtidas pelo ClorofiLOG; TS (Temperatura da Superfície da folha); UH (Umidade do Ar) e TS (Temperatura do Solo).

### Assimilação líquida de CO<sup>2</sup>

O Índice de Vegetação Normalizada (NDVI) e o Índice de vegetação Fotossintético (PRI), foram utilizados em alguns trabalhos para

Figura 2. Esquema dos pontos de coletas de dados. estimar o fluxo de carbono (Silva e Baptista, 2015; Martins e Batista, 2013; Peñuelas et al., 2011) e nesta pesquisa para quantificar a assimilação líquida de CO<sup>2</sup> pela vegetação da área de caatinga preservada. Realizando-se os cálculos a partir das seguintes equações:

$$NDVI = \frac{(R_{800} - R_{660})}{(R_{800} + R_{660})} \quad (1)$$

Em que:

R<sub>800</sub> = Reflectância na faixa do infravermelho próximo (800 nm)

R<sub>670</sub> = Reflectância na faixa do vermelho (660 nm)

$$PRI = \frac{(R_{531} - R_{570})}{(R_{531} + R_{570})} \quad (2)$$

Em que:

R<sub>531</sub> = Reflectância na faixa do azul (531 nm)

R<sub>570</sub> = Reflectância na faixa do verde (570 nm)

Após a obtenção do índice PRI é necessário um reescalonamento para transformar os valores resultantes em números positivos. Dessa

forma é gerado um novo índice, o sPRI que passa a ser representado em uma escala que varia entre 0 e 1, a mesma do NDVI. A equação de obtenção do sPRI proposta por Rahman et al. (2000) está representada a seguir:

$$sPRI = \frac{PRI+1}{2} \quad (3)$$

Os índices NDVI e PRI foram utilizados para gerar o índice de fluxo de CO<sub>2</sub> proposta por Rahman et al. (2000), representada a seguir:

$$CO_2 = -5,6 (NDVI \times sPRI) - 0,69 \quad (4)$$

#### *Déficit de Pressão de vapor (DVP)*

Para obtenção do Déficit de Pressão de vapor (DVP) foram utilizadas as seguintes equações:

$$es = 0,611 \exp \left( \frac{17,27 \times T}{T + 237,3} \right) \quad (5)$$

$$ea = UR \frac{es}{100} \quad (6)$$

$$DPV = es - ea \quad (7)$$

Em que:

T= Temperatura do ar (°C)

UR = Umidade relativa do ar (%)

es = Pressão de saturação do vapor d'água (hPa)

ea = Pressão parcial de vapor d'água (hPa)

exp = Base do logaritmo natural (2,7183)

Através dos dados obtidos, realizou-se uma análise estatística por meio do *software* SPSS 20.0, licenciado pelo Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento (SERGEO), para avaliar as variáveis que melhor se correlacionaram com a Assimilação Líquida de Carbono (NPP).

#### *Simulação da variação climática*

Foram obtidos os dados climáticos provenientes do modelo climático regional ETA, organizado em mesoescala em ponto de grade, de equações primitivas, com versão operada pelo CPTEC/INPE. Esse modelo é hidrostático com resolução de 40 km e 80 km, possuindo 38 camadas nas duas resoluções na vertical e recobrem o território da América do Sul praticamente por completo (Moura et al., 2010). De acordo com os autores, o modelo se constitui de uma ferramenta importante para análise das condições atmosféricas. Os cenários gerados, desde os mais extremos aos mais conservadores são baseados em

forçantes controladoras como demografia, níveis de emissões, mudanças na tecnologia, matrizes energéticas, assim como a complexa interação entre as variáveis físicas.

A partir do recorte do modelo para a América do Sul, foi realizado um subrecorte pelo Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP) para área do município de Petrolina. Nesta configuração, a resolução espacial do modelo passou a ser de 20 km<sup>2</sup>, permitindo maior nível de detalhes quanto a espacialização das projeções. Em seguida, foi realizada a simulação da variação do clima até o ano de 2040, considerando as configurações dos cenários considerados otimistas. Esses dados foram visualizados e analisados no *software* GrADS (Grid Analysis and Display System), que trabalha com dados em formato de pontos de grade e é bastante utilizado na manipulação de dados geofísicos em geral, sendo sua distribuição totalmente livre e gratuita.

Para projetar os efeitos das mudanças climáticas sobre as variáveis estimadas, empregou-se os dados gerados pelo modelo climático ETA. Deste modo, os dados atmosféricos utilizados nas equações anteriormente descritas, foram substituídos pelos projetados até o ano de 2040.

Para medir o grau de relacionamento entre duas variáveis foi aplicado o método de correlação linear de Pearson. A partir dos resultados foram gerados gráficos e equações de regressão com NPP, T, UR e DVP para analisar as correlações. Também foram elaborados gráficos com as variáveis projetadas pelo modelo ETA e a assimilação líquida de carbono observada com os dados de campo, onde foi aplicado o teste estatístico de Mann-Kendall que de acordo com Hipel e McLeod (1994) é utilizado para verificar se a tendência é estatisticamente significativa ou não.

#### *Teste de Mann-Kendall*

O teste Mann-Kendall (MK) foi aplicado neste estudo para detectar possíveis alterações de ordem climática das séries de temperatura assim como a resposta da vegetação em relação às possíveis mudanças. Por meio do método estatístico de MK, é possível testar as hipóteses (H<sub>0</sub> e H<sub>1</sub>) para tendência de longo prazo das séries temporais. Para esta análise, a hipótese é nula (H<sub>0</sub>) quando não se observa tendência na população de um conjunto de dados (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, ..., X<sub>n</sub>). Já a hipótese H<sub>1</sub> refere-se à detecção de alguma tendência monotônica observada no tempo, sendo assim, há rejeição da hipótese H<sub>0</sub>.

Conforme Goossens e Berger (1986) o MK é o método estatístico mais recomendado para detectar possíveis alterações nas séries climáticas

decorrentes das mudanças nos padrões climáticos de uma determinada região.

Deste modo, dada uma determinada série temporal,  $x_i$  de  $N$  termos ( $1 \leq i \leq n$ ), o MK é determinado por meio da soma  $t_n$  de um conjunto de termos  $m_i$ , relativo ao valor  $x_i$ , pelo qual os termos anteriores ( $j < i$ ) são inferiores ao mesmo, conforme descrito na Equação (1) seguir:

$$t_n = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (8)$$

Em séries temporais com grande número de termos ( $N$ ), sob a hipótese nula  $H_0$  de ausência de tendência,  $t_n$  apresentará uma distribuição normal com média  $E(t_n)=0$  e variância:

$$\text{VAR}t_n = \sqrt{(n/18)(n-1)(2n-5)}$$

(9)

Para rejeição da hipótese nula, é aplicado o teste de significância estatística de  $t_n$  por meio de um teste bilateral para grandes valores  $U(t_n)$ , por meio de:

$$U(t_n) = (t_n - E(t_n))/(\text{var}(t_n))^{1/2} \quad (10)$$

Na versão sequencial, duas curvas ( $U(t_n)$  e  $U^*(t_n)$ ) e o seu inverso, são geradas. Deste modo, como resultado da interação entre as mesmas, obtêm-se o ponto aproximado da mudança abrupta na mediana da série, caso o valor encontre-se dentro do intervalo de confiança estatística  $1,96 < u(t_n) < 1,96$ , para o qual  $1,96$  corresponde a  $\alpha = 0,05$ . Ou seja, o ponto aproximado do início de uma tendência é detectado quando a curva  $U(t_n)$  cruza os limites de confiança ao nível de 95%, onde  $\alpha = 0,05$ .

## Resultados e discussão

### Cenário atual

Fatores climáticos afetam a NPP (Gibson e Wang, 2016). Assim, a identificação e análise de diferentes variáveis pode apresentar quais fatores são capazes de gerar modelos mais precisos para diferentes regiões.

As correlações entre as variáveis (Tabela 1), de modo geral foram baixas. Ao analisar individualmente a NPP, índice que nos permite avaliar quanto de carbono está sendo assimilado pela vegetação, foi possível identificar que o índice correlacionou melhor com as variáveis, temperatura do ar sendo positiva e umidade relativa do ar sendo negativa com valores de 0,476 e -0,564 respectivamente. Gao et al. (2006) analisaram a variação interanual da NPP e temperatura em Xinjiang na China no período de 1981 a 2000 e encontraram  $R^2$  de 0,31, contudo afirmaram que 71% da área é árida e com vegetação esparsa não sendo significativamente afetado. Gao et al. (2013) encontraram um  $R^2$  de 0,83 para NPP total anual e temperatura média anual no período de 2001 a 2008 no Platô Tibetano

na China. Já para Michaletz et al. (2014) a idade das plantas e biomassa tem maior influência sobre o NPP que fatores climáticos como precipitação e temperatura. Eisfelder et al. (2014) encontrou resultados satisfatórios no Cazaquistão, que possui condições áridas e semiáridas, obtendo uma correlação positiva ( $r > 0,6$  para 90% da área) para o índice e a radiação fotossinteticamente ativa e temperatura. De toda maneira, o NPP é um indicador de produtividade de ecossistemas, podendo fornecer uma perspectiva acerca do estado e tendência do ambiente (Niemeijer, 2002). No semiárido nordestino, o comportamento dessa variável obedece às variações da precipitação pluviométrica. De acordo com Ferreira et al. (2015), os maiores valores de NPP são observados durante o período chuvoso. Segundo os autores, isto ocorre devido aos mecanismos adaptativos da vegetação, que entre outras funções, libera sua folhagem para redução do estresse luminoso e perda de água por evapotranspiração. Os autores destacam que os indivíduos que conseguem manter sua folhagem durante o período seco têm suas atividades fotossintéticas bem reduzidas. Isto porque sob condição de estresse hídrico, a vegetação tende a degradar o conteúdo de Clorofila B, responsável por transportar energia para a Clorofila A, comprometendo a estrutura foliar das plantas, e conseqüentemente aumentando os valores de reflectância dos alvos.

A Figura 3 representa a correlação da variável temperatura do ar com a NPP e de acordo com o gráfico existe uma relação positiva de 0,22. Observa-se que o aumento da temperatura na faixa de 35°C a 40°C é refletido na assimilação de carbono, que tende a acompanhar a crescente térmica. Porém, os intervalos térmicos acima do limite máximo identificado indicam que em condições de temperaturas elevadas NPP é comprometida, provavelmente relacionado ao mecanismo de defesa das plantas desenvolvido para manutenção do seu funcionamento fisiológico.

Tabela 1. Correlação dos Índices de vegetação, índices de pigmentação e variáveis.

|         | PRI*   | MCARI* | OSAVI* | TCARI* | MTVI*  | NDVI*  | ChlA*  | ChlB*  | Chl T.* | NPP*   | Chl A  | Chl B  | Chl T. | TSF    | TA     | UH    | TS    |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| PRI*    | 1.000  | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---     | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---   | ---   |
| MCARI*  | -0.184 | 1.000  | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---     | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---   | ---   |
| OSAVI*  | -0.594 | 0.665  | 1.000  | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---     | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---   | ---   |
| TCARI*  | -0.341 | 0.948  | 0.841  | 1.000  | ---    | ---    | ---    | ---    | ---     | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---   | ---   |
| MTVI*   | -0.631 | 0.762  | 0.954  | 0.898  | 1.000  | ---    | ---    | ---    | ---     | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---   | ---   |
| NDVI*   | 0.200  | -0.190 | 0.031  | -0.185 | -0.110 | 1.000  | ---    | ---    | ---     | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---   | ---   |
| Chl A*  | 0.392  | -0.437 | -0.357 | -0.500 | -0.453 | 0.748  | 1.000  | ---    | ---     | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---   | ---   |
| Chl B*  | 0.335  | -0.448 | -0.360 | -0.516 | -0.437 | 0.699  | 0.963  | 1.000  | ---     | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---   | ---   |
| Chl T.* | -0.056 | 0.589  | 0.444  | 0.613  | 0.472  | -0.188 | -0.277 | -0.262 | 1.000   | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---   | ---   |
| NPP*    | 0.352  | -0.208 | -0.056 | -0.226 | -0.200 | 0.987  | 0.780  | 0.725  | -0.184  | 1.000  | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---   | ---   |
| Chl A   | 0.128  | -0.342 | -0.308 | -0.373 | -0.319 | 0.150  | 0.248  | 0.267  | -0.246  | 0.163  | 1.000  | ---    | ---    | ---    | ---    | ---   | ---   |
| Chl B   | -0.071 | -0.065 | -0.012 | -0.010 | 0.062  | -0.265 | -0.273 | -0.283 | 0.006   | -0.263 | 0.252  | 1.000  | ---    | ---    | ---    | ---   | ---   |
| Chl T.  | 0.079  | -0.301 | -0.250 | -0.306 | -0.234 | 0.059  | 0.130  | 0.143  | -0.201  | 0.069  | 0.943  | 0.551  | 1.000  | ---    | ---    | ---   | ---   |
| TSF     | 0.199  | -0.219 | -0.204 | -0.212 | -0.203 | 0.187  | 0.218  | 0.229  | -0.124  | 0.212  | 0.041  | 0.089  | 0.061  | 1.000  | ---    | ---   | ---   |
| TA      | 0.237  | -0.239 | -0.152 | -0.244 | -0.250 | 0.453  | 0.429  | 0.425  | -0.296  | 0.476  | 0.067  | -0.124 | 0.014  | 0.662  | 1.000  | ---   | ---   |
| UH      | -0.441 | 0.384  | 0.396  | 0.435  | 0.490  | -0.517 | -0.480 | -0.461 | 0.454   | -0.564 | -0.195 | 0.164  | -0.117 | -0.480 | -0.667 | 1.000 | ---   |
| TS      | -0.042 | 0.034  | -0.014 | 0.013  | 0.056  | -0.036 | 0.021  | 0.053  | 0.098   | -0.033 | -0.139 | 0.185  | -0.070 | 0.430  | 0.359  | 0.052 | 1.000 |

\*Índices calculados a partir das medidas do espectrorradiômetro.

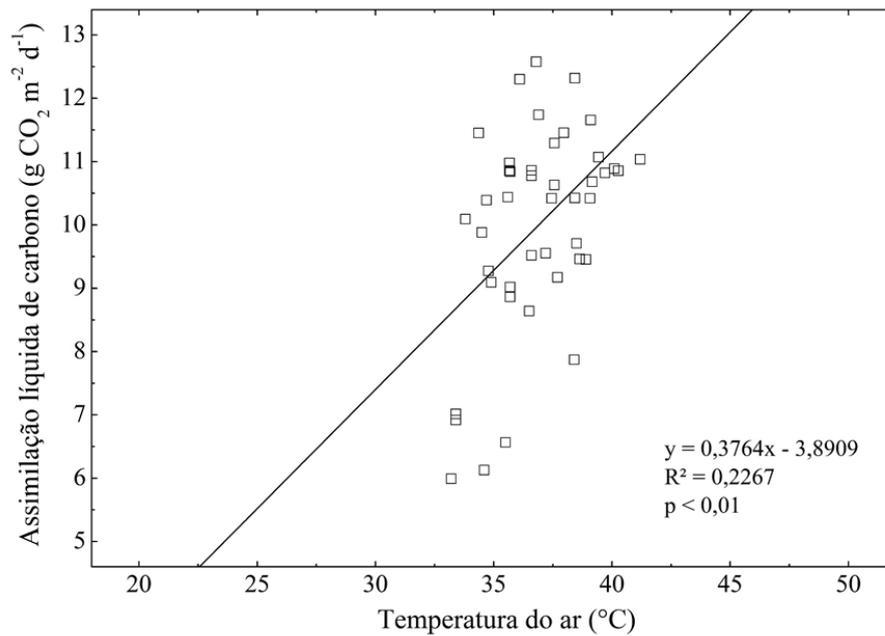


Figura 3. Correlação entre NPP e Temperatura do ar.

Santos e Costa (2003) ao analisar uma floresta tropical da Amazônia, constatou que em horários próximos ao meio dia, com a temperatura do ar mais elevadas ocorre um ligeiro fechamento dos estômatos e diminuição da fotossíntese o que evita a perda de água por evaporação e diminuindo das taxas de assimilação de CO<sub>2</sub>.

Já na vegetação de Caatinga em estudo realizado por Cunha et al. (2013), observou-se também, uma diminuição das taxas de assimilação de CO<sub>2</sub> pela vegetação em condições de baixa umidade do ar e altas temperaturas, se mantendo com taxas baixas durante a estação seca.

Cabral et al. (2011) mencionam que a dinâmica sazonal dos fluxos de CO<sub>2</sub> podem ser

relacionados a umidade do ar, radiação de onda curta, precipitação e umidade do solo. Em relação a umidade relativa do ar, a correlação inversa entre a NPP e a umidade relativa do ar (Figura 4), indica que enquanto a umidade permanece entre 20% e 30% ocorre uma maior assimilação líquida de carbono pela vegetação. Na medida em que este percentual é aumentado, verifica-se diminuição do potencial de assimilação de carbono pela vegetação. Deng et al. (2016) verificaram que elevados valores de umidade eram log-linearmente relacionados a altos valores de NPP no estudo num ambiente ecologicamente frágil na Província de Qinghai na China.

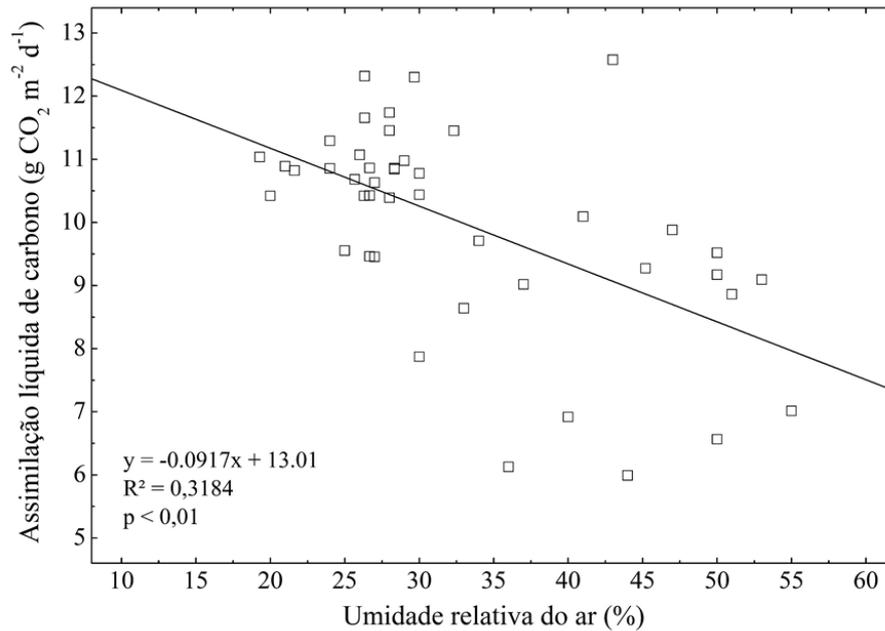


Figura 4. Correlação entre a NPP e a Umidade Relativa do ar.

Dentre as variáveis climáticas, a precipitação foi citada em vários trabalhos pela sua correlação com a Assimilação líquida de carbono (NPP) para área de Caatinga, Cunha et al. (2013) verificaram baixos valores de NPP nos meses de baixos índices pluviométricos, que se estende de junho a dezembro. Os autores também verificaram que na estação chuvosa uma área de agropecuária

apresentou um maior consumo de CO<sub>2</sub> em relação a caatinga natural e caatinga degradada.

Em relação ao déficit de pressão de vapor, este apresentou uma correlação positiva de 0,30 (Figura 5). É possível observar que entre as variáveis analisadas a que apresentou melhor correlação com a NPP foi o déficit de pressão de vapor, tendo maior assimilação líquida de carbono no intervalo de 3 a 6 KPa.

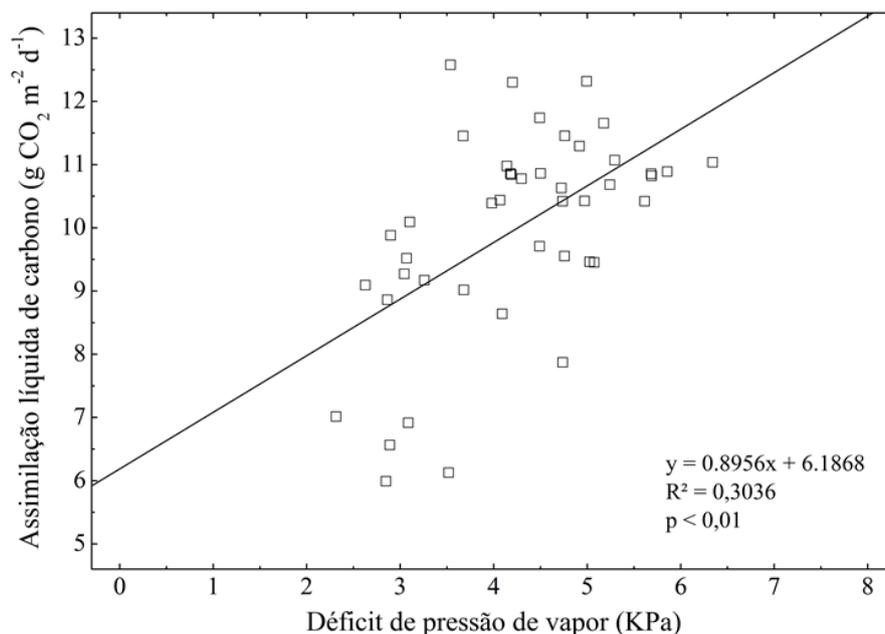


Figura 5. Correlação entre NPP e Déficit de Pressão de Vapor.

#### Cenário futuro

A Figura 6 representa o padrão de temperatura média do ar modelado pelo ETA para

o município de Petrolina. Conforme pode ser observado, verifica-se uma tendência de aumento da temperatura para a região. O final da série corresponde ao período onde são verificados maiores valores térmicos, onde a diferença de temperatura chega à 2°C em relação ao início da série. Este resultado corrobora diversas outras pesquisas sobre as mudanças climáticas no semiárido pernambucano.

Segundo Ferreira et al. (2016), até o ano de 2050, vários municípios inseridos no referido domínio climático devem ter suas áreas agricultáveis reduzidas em função do aumento da temperatura média. Resultados semelhantes, envolvendo o aumento da temperatura média do ar também foram verificados por Marengo (2006) para todo o semiárido nordestino. O pesquisador aplicou vários modelos utilizados pelo IPCC para todo território brasileiro. Os modelos conflitaram em suas previsões para algumas regiões, como a da Amazônia e bacia do rio Prata. Já para o Nordeste, todos indicaram aquecimento geral.

Na Figura 7 está representada a projeção da umidade relativa do ar. É possível observar um constante declínio dos valores referentes a este indicador. No último ano da projeção (2040), a diferença atinge quase 5% em relação ao ano de partida. Constata-se também que por volta de 2020 e 2025 correspondem aos anos em que a diferença

negativa é mais acentuada. Este é um importante indicador para avaliação dos ecossistemas naturais e possui relação forte com outros elementos atmosféricos.

Este comportamento era esperado, principalmente quando se leva em consideração o a tendência das duas variáveis mais investigadas para determinar a condição do clima no futuro (temperatura e precipitação). Para o Nordeste, o aumento da temperatura, constatado neste estudo e em vários outros, deve ser acompanhado pela redução do volume das chuvas. As mudanças identificadas pelos modelos climáticos empregados evidenciam mudanças sutis no que se refere ao período em que as chuvas ocorrem. Porém, as alterações mais significativas referem-se ao encurtamento da estação chuvosa e prolongamento da estação seca. Dentro do período chuvoso, espera-se que a precipitação seja mais escassa. Arelado aos fatos citados, outro agravante deve ser verificado, este relacionado aos eventos extremos. Com as mudanças climáticas, os extremos de precipitação devem se tornar mais recorrentes. Deste modo, os eventos de seca na região devem ser prolongados e mais frequentes, causando prejuízos, ainda incertos, sobre os sistemas naturais e socioeconômicos.

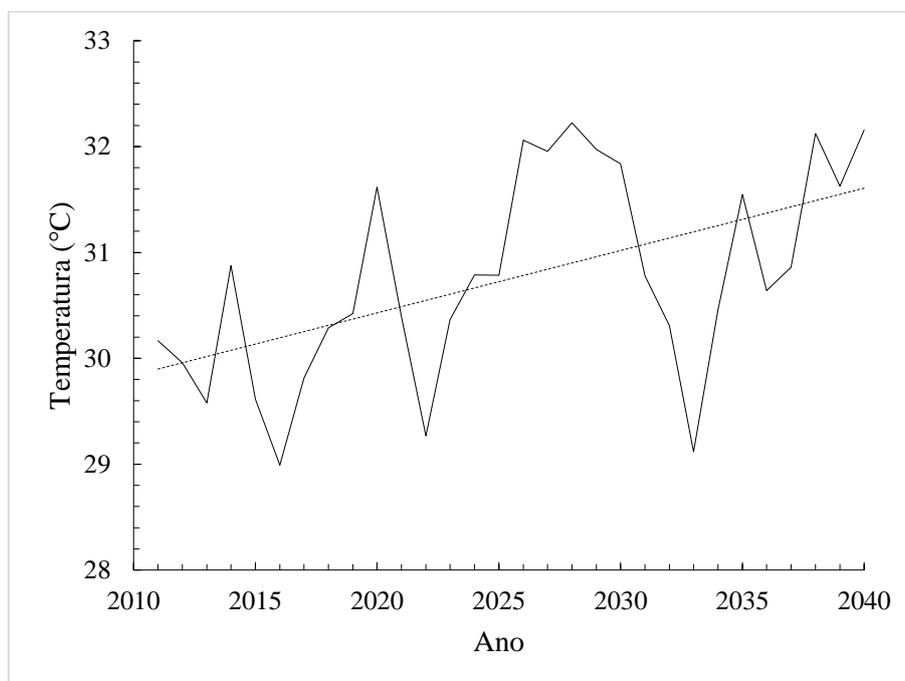


Figura 6. Comportamento da temperatura média projetada pelo ETA para o período de 2011 a 2040.

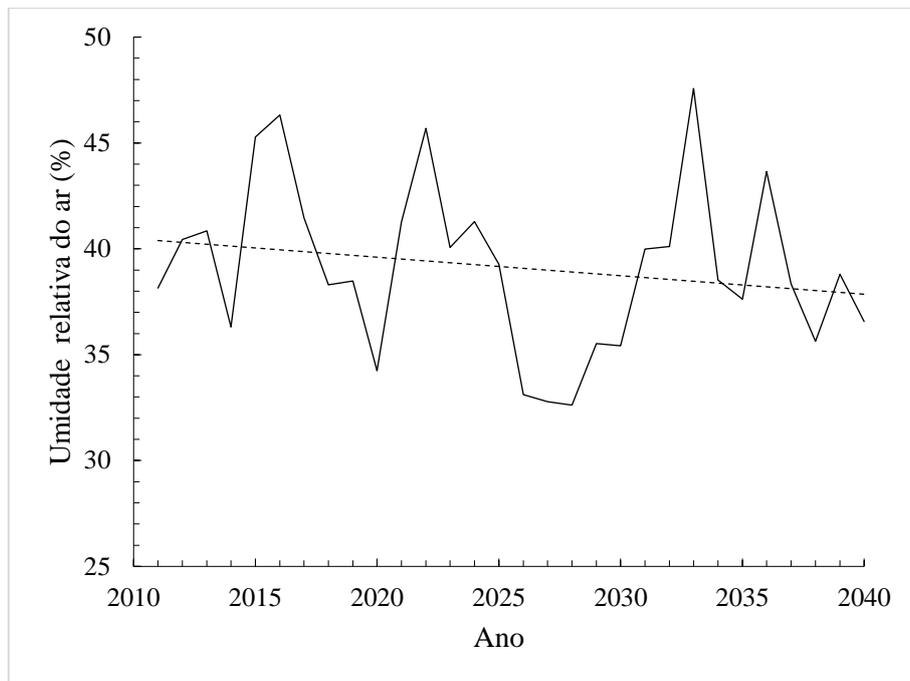


Figura 7. Umidade relativa do ar projetada com base nos dados gerados pelo modelo ETA.

Quanto a Figura 8, esta representa o Déficit de Pressão de Vapor (VPD) em KPa, projetado com base nos valores de temperatura modelado pelo ETA. O VPD representa a diferença entre a pressão desempenhada pelo acúmulo de vapor d'água na atmosfera e a pressão máxima atingida.

Este indicador tem relação direta com o comportamento de variáveis atmosféricas como a temperatura ar. O aumento do VPD indica que o gradiente de umidade está seguindo uma tendência contrária. Seu comportamento ascendente sugere que a maior parte da energia eletromagnética

irradiada pelo Sol está sendo empregada para geração de calor nas superfícies, devido à reduzida quantidade de água acumulada. Porém, a quantidade de energia calorífica retida pelas partículas de gases e água em forma de vapor é reduzida.

As condições ambientais citadas favorecem a perda de água por evaporação, sobretudo no que refere a vegetação, seja ela natural ou agrícola.

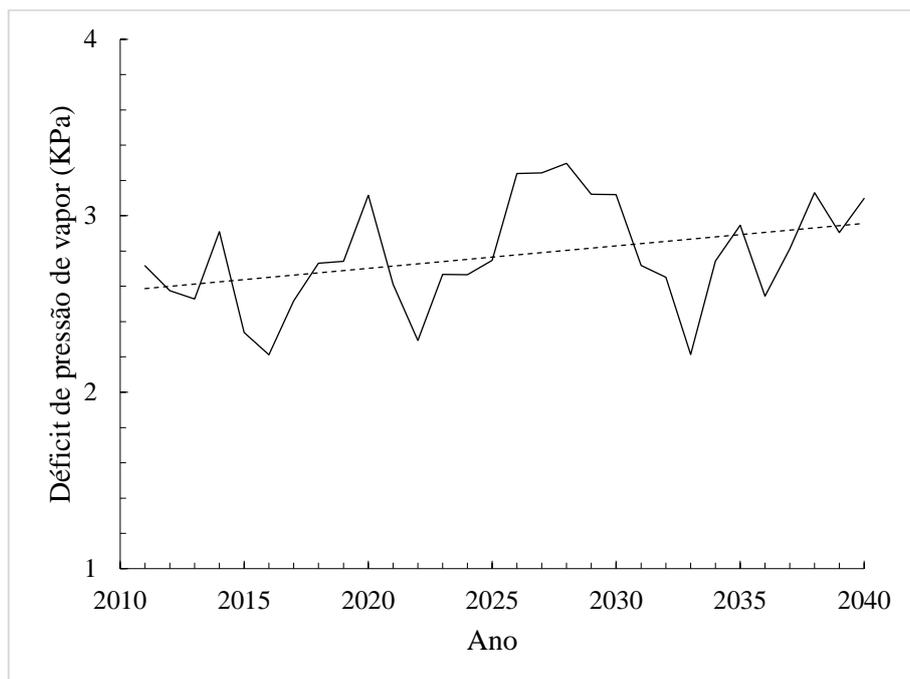


Figura 8. Déficit de pressão de vapor

A Figura 9 expressa a relação entre a assimilação líquida de carbono e algumas variáveis projetadas pelo modelo Climático ETA, como temperatura, umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor, esta, calculada a partir dos dados atmosféricos do modelo. No gráfico de temperatura os valores de NPP variam entre 6,8 a aproximadamente 8,4 g m<sup>2</sup> d, enquanto que a temperatura mínima e máxima projetada pelo modelo é respectivamente 19°C e 38°C. Observa-se um certo aumento na quantidade de carbono assimilado pela vegetação a medida em que a temperatura aumenta.

A relação ente NPP e a umidade relativa do ar projetada, revela uma leve tendência para o

aumento da assimilação líquida de carbono, na proporção em que a umidade aumenta. O déficit de pressão de vapor, expressou uma leve tendência de aumento.

Na identificação de tendência da série, através do método estatístico proposto por Mann-Kendall, para as três variáveis analisadas, temperatura, umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor, constatou-se que houve aumento da assimilação líquida de carbono em razão do aumento dos valores das referidas variáveis. O teste estatístico apontou que há significância nos resultados obtidos.

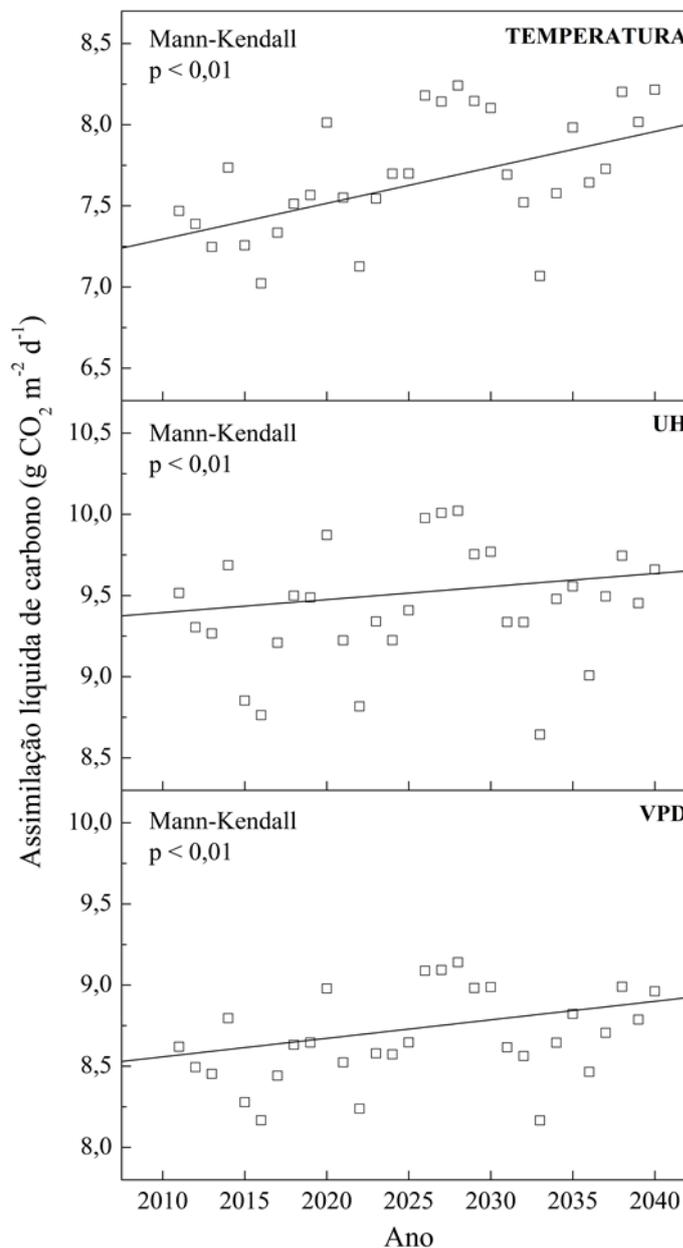


Figura 9. Relação entre a NPP e a temperatura do ar, Umidade Relativa do ar, e Déficit de Pressão de Vapor, projetados até o ano de 2040.

## Conclusões

As variáveis projetadas pelo ETA indicaram que a tendência de aumento da temperatura, umidade e déficit de pressão de vapor deve favorecer a assimilação de carbono pela vegetação de caatinga no futuro. Diante das incertezas acerca das mudanças climáticas, os resultados aqui observados revelam o importante papel que o bioma caatinga exerce no equilíbrio climático da região. Ou seja, a manutenção e preservação desse bioma são de grande importância para o equilíbrio ambiental diante da ameaça das mudanças climáticas. Ainda que o aumento da temperatura contribua para que as plantas assimilem maior quantidade de carbono, é preciso o desenvolvimento de outros estudos no sentido de verificar a tolerância da vegetação a temperaturas mais elevadas. Vale ressaltar que o cenário projetado pelo modelo e utilizado no presente estudo é resultante de uma estimativa otimista. Ou seja, as temperaturas médias globais para os anos analisados podem sofrer algum incremento, podendo vir a causar danos ao comportamento fisiológico das vegetações e prejudicando sua capacidade de resiliência.

## Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de iniciação científica ao primeiro autor e pela bolsa de produtividade de pesquisa do segundo autor. A CAPES através do projeto PVE A 103/2013. À FACEPE pelo apoio financeiro junto ao Projeto Monitoramento dos fluxos de radiação, energia, CO<sub>2</sub> e vapor d'água e da fenologia em áreas de Caatinga: Caatinga-FLUX Fase 2 (Processo APQ 0062-1.07/15). Ao CNPq através do projeto SUPPer/ processo número: 446254/2015-0.

## Referências

- Althoff, T.D., Menezes, R.S.C., Carvalho, A.L.de, Pinto, A.deS., Santiago, G.A.C.F., Ometto, J.P.H.B., Randow, C.V., Sampaio, E.V.de S.B., 2016. Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality, Northeast Brazil. *Forest Ecology and Management* 360, 367–375.
- Alves, J.J.A., Araujo, M.A.de, Nascimento, S.S.do., 2009. Degradação da caatinga: uma investigação ecogeográfica. *Revista Caatinga* 22, 126-135.
- Andrade, W.M.de, Lima, E.deA., Rodal, M.de J.N., Encarnação, C.R.F.da., Pimentel, R.M.deM., 2009. Influência da precipitação na abundância de populações de plantas da caatinga. *Revista de Geografia* 26, 161-184.
- Bastianseen, W.G.M., Ali. S., 2003 A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin. *Agriculture Ecosystems & Environment* 94, 321-340.
- Beuchle, R., Grecchi, R.C., Shimabukuro, Y.E., Seliger, R., Eva, H.D., Sano, E., Achard, F., 2015. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. *Applied Geography* 58, 116–127.
- Cabral, O.M.R., Gash, J.H.C., Rocha, H.R. Marsden, C., Ligo, M.A.V., Freitas, H.C., Tatsch, J.D., Gomes, E., 2011. Fluxes of CO<sub>2</sub> above a plantation of Eucalyptus in southeast Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 49-59.
- Calixto Júnior, J.T., Drumond, M.A., 2011. Estrutura fitossociológica de um fragmento de caatinga sensu stricto 30 anos após corte raso, Petrolina-PE, Brasil. *Revista Caatinga* 24, 67–74.
- Costa, T.C.C.da., Oliveira, M.A.J., Accioly, L.J.de O., Silva, F.H.B.B.da, 2009. Análise da degradação da caatinga no núcleo de desertificação do Seridó (RN/PB). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 13, 961–974.
- Cunha, A.P.M.doA., Alvalá, R.C.dosS., Oliveira, G.S.de, 2013. Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia* 28, 139-152.
- Silva, S.C.P.da, Baptista, G.M.M., 2015 Análises espectrais da vegetação com dados Hyperion e sua relação com a concentração e o fluxo de CO<sub>2</sub> em diferentes ambientes na Amazônia brasileira. *Boletim de Ciências Geodésicas* 21, 354-370.

- Deng, X., Gibson, J., Wang, P., 2016. Quantitative measurements of the interaction between net primary productivity and livestock production in Qinghai Province based on data fusion technique. *Journal of Cleaner Production* [online]. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.057>. Acesso: 23 set. 2016.
- Eisfelder, C., Klein, I., Niklaus, M.Y., Kuenzer, C., 2014. Net primary productivity in Kazakhstan, its spatio-temporal patterns and relation to meteorological variables. *Journal of Arid Environments* 103, 17-30.
- Ferraz, J.S.F., Ferreira, R.L.C., Silva, J.A.A. da, Meunier, I.M.J., Santos, M.V.F. dos, 2014. Estrutura do componente arbustivo-arbóreo da vegetação em duas áreas de caatinga, no município de Floresta, Pernambuco. *Revista Árvore* 38, 1055-1064.
- Ferreira, P.dosS., Miranda, R. de Q., Gomes, V. P., Moura, M.S.B.de., Galvêncio, J.D., 2015. Sazonalidade dos fluxos de carbono em uma área de Caatinga. In: VII Workshop de Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco. Recife.
- Ferreira, P.dosS., Gomes V.P., Santos, A.M., Souza, W.M., Galvêncio J.D., 2016. Mudanças climáticas e a Geopotencialidade à fruticultura em municípios de Pernambuco: subsídios à agricultura familiar. *Caderno de Geografia* 26, 522-554.
- Gao, W., Gao, Z., Pan, X., Slusser, J., Yimit, H., Ma, Y., 2016. The Impact of Precipitation and Temperature on Net Primary Productivity in Xinjiang, China from 1981 to 2000, in: Qu, J.J., Gao, W., Kafatos, M., Murphy, R.E., Salomonson, V.V. (Ed.). *Earth Science Satellite Remote Sensing: v. 2 - Data, Computational Processing, and Tools*. Springer Berlin Heidelberg, 292-305.
- Gao, Y., Zhou, X., Wang, Q., Wang, C., Zhana, Z., Chend, L., Yane, J., Qua, R., 2013. Vegetation net primary productivity and its response to climate change during 2001–2008 in the Tibetan Plateau. *Science of The Total Environment* 444, 356–362.
- Goossens, C., Berger, A., 1994. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. *Annales Geophysicae* 4, 385-400.
- Hipel, K.W., McLEOD, A.I., 1994. Time series modelling of water resources and environmental systems. Amsterdam: Elsevier 1013.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2004. Mapa de Biomas do Brasil.
- Lucena, D.B., Gomes Filho, M.F., Servain, J., 2011. Impact evaluation of the extreme climatic events in the pacific and atlantic oceans on the northeast Brazil rainy season. *Revista Brasileira de Meteorologia* 26, 297–312.
- Marengo, J. A., 2007. Mudanças climáticas e seus efeitos sobre a Biodiversidade: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o Território Brasileiro ao longo do Século XXI. (MMA. Series Biodiversidade, 26,).
- Martins, L.N., Baptista, G.M.deM., 2013. Análise multitemporal do sequestro florestal de carbono no projeto de Assentamento Carão, Acre. *Revista Brasileira de Geografia Física* 6, 1648-1657.
- Menezes, R.S.C., Sampaio, E.V.S.B., Giongo, V., Perez-Marin, A.M., 2012. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. *Brazilian Journal of Biology* 72, 643-653.
- Michaletz, S.T., Cheng, D., Kerkhoff, A.J., Enquist, B.J. Convergence of terrestrial plant production across global climate gradients. *Nature* 512, 39-43.
- Moura, R.G.de, Herdies, D.L., Mendes, D., Mendes, M.C.D., 2010. Avaliação do modelo regional ETA utilizando as análises do CPTEC e NCEP. *Revista Brasileira de Meteorologia* 25, 46–53.
- Moreira, J.N., Lira, M.deA., Santos, M.V.F.dos, Ferreira, M.deA., Araújo, G.G.L.de, Ferreira, R.L.C., Silva, G.C.da, 2006. Caracterização da vegetação de Caatinga e da dieta de novilhos no Sertão de Pernambuco. *Pesquisa agropecuária Brasileira* 41, 1643-1651.
- Namayanga, L.N., 2002. Estimating terrestrial carbon sequestered in above ground woody biomass from remotely sensed data. (The use of SEBAL and CASA algorithms in a semiarid area of Serowe-Botswana). Thesis (Doctoral). Enschede-The Netherlands, ITC.
- Niemeijer, C., 2002. Developing indicators for environmental policy: data-driven and theory-driven approaches examined by example. *Environmental Science & Policy* 5, 91–103.
- Peñuelas, J., Garbulsky, M.F., Filella, I., 2011. Photochemical reflectance index (PRI) and remote sensing of plant CO<sub>2</sub> uptake. *New Phytologist* 191, 596–599.
- Rahman, A. Gamon, J.A., Fuentes, D.A., Roberts, D.A., Prentiss, D., 2001. Modeling distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral

- indices from AVIRIS imagery. *Journal of Geophysical Research* 106, 579-591.
- Santos S.N.M., Costa M.H., 2003. Simulações de fluxo de carbono em um ecossistema de floresta tropical. *Revista Brasileira de Meteorologia* 18, 87-97.
- Souza, B.I., Menezes, R., 2015. Efeitos da desertificação na composição de espécies do bioma Caatinga, Paraíba/Brasil. *Investigaciones Geograficas* 88, 45-59.
- Trigueiro, E.R.daC., Oliveira, V.P.V., Bezerra, C.L., 2009. Indicadores biofísicos da degradação/ desertificação no bioma caatinga: estudo de caso no município de Tauá, Ceará. *REDE – Revista Eletrônica do Prodema* 3, 62-82.