



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA**  
**Departamento de Ciências Exatas**  
**Programa de Pós-Graduação em Modelagem em**  
**Ciências da Terra e do Ambiente**



**MODELAGEM ESPECTRAL PARA DETERMINAÇÃO DE**  
**FLUXO DE CO<sub>2</sub> EM ÁREAS DE CAATINGA PRESERVADA E EM**  
**REGENERAÇÃO**

**CLOVES VILAS BOAS DOS SANTOS**

**FEIRA DE SANTANA, 2017**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA**  
**Departamento de Ciências Exatas**  
**Programa de Pós-Graduação em Modelagem em**  
**Ciências da Terra e do Ambiente**



**MODELAGEM ESPECTRAL PARA DETERMINAÇÃO DE**  
**FLUXO DE CO<sub>2</sub> EM ÁREAS DE CAATINGA PRESERVADA E EM**  
**REGENERAÇÃO**

**CLOVES VILAS BOAS DOS SANTOS**

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente da Universidade Estadual de Feira de Santana como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista.

Coorientadora: Dr<sup>a</sup>. Magna Soelma Beserra de Moura

FEIRA DE SANTANA, 2017

# Cloves Vilas Boas dos Santos

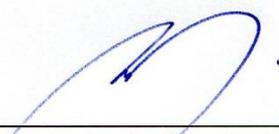
## MODELAGEM ESPECTRAL PARA DETERMINAÇÃO DE FLUXO DE CO<sub>2</sub> EM ÁREAS DE CAATINGA PRESERVADA E EM REGENERAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente da Universidade Estadual de Feira de Santana. Orientada pelo Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista e coorientada por Magna Soelma Beserra de Moura.

Linha de Pesquisa: Estudos Ambientais e Geotecnologias.

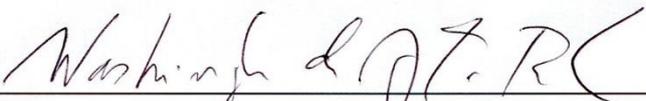
Data de aprovação: 17 de Fevereiro de 2017.

### BANCA EXAMINADORA:



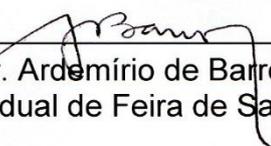
---

Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista (Orientador)  
Universidade de Brasília (UnB)



---

Prof. Dr. Washington de Jesus Sant'Anna da Franca-Rocha  
Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)



---

Prof. Dr. Ardemírio de Barros Silva.  
Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)

**Ficha Catalográfica – Biblioteca Central Julieta Carteadó**

Santos, Cloves Vilas Boas dos  
S234m Modelagem espectral para determinação de fluxo de CO<sub>2</sub>  
em áreas de caatinga preservada e em regeneração./ Cloves  
Vilas Boas dos Santos. Feira de Santana, 2017.  
75f.: il.

Orientador: Gustavo Macedo de Mello Baptista  
Coorientador: Magna Soelma Beserra de Moura  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira  
de Santana. Programa de Pós-Graduação em Modelagem em  
Ciências da Terra e do Ambiente, 2017.

1.Bioma caatinga. 2.Fluxo de carbono. 3.Sensoriamento  
remoto multiespectral. I.Baptista, Gustavo Macedo de Mello  
(orient.). II.Moura, Magna Soelma Beserra de (coorient.).  
III.Universidade Estadual de Feira de Santana. IV. Título.

CDU : 581.132

“... Se você quiser alguém  
Em quem confiar  
Confie em si mesmo  
Quem acredita sempre alcança! ...”

Mais uma vez  
(Renato Russo e Flávio Venturini)

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus por está comigo sempre, pelas graças concebidas em minha vida e pelas pessoas maravilhosas que colocou no meu caminho.

A minha família por ser o meu alicerce para eu ter conquistado tudo isso. Aos meus pais Anair e José por acreditarem em mim e me apoiarem todas as decisões que tomei até hoje. Aos meus irmãos Cláudio e Edlene pelo apoio e também por acreditarem em mim.

A minha amiga Mônica pelo incentivo antes e durante o mestrado, pelos os conselhos, isso fez eu superar de forma mais fácil os desafios que vieram, e a todos os meus amigos que torceram por mim durante toda essa jornada.

Ao professor Gustavo Baptista pela amizade, oportunidade e confiança, por acreditar em mim, agradeço também por todos os ensinamentos durante a realização desse trabalho. Jamais esquecerei todo o aprendizado.

A Magna Moura pela amizade e oportunidade de poder trabalhar mais uma vez, pelo apoio e confiança, por acreditar e pelos ensinamentos ao longo de todo o tempo que estivemos trabalhando, contribuindo muito para a minha formação, também por ter sido paciente, e pelos seus conselhos. Muito obrigado.

Agradeço também ao meu professor Ardemírio Barros, que me ensinou tantas coisas boas, que vou levar para o resto da minha vida, nunca vou esquecer essa grande pessoa que é um exemplo de humildade, para mim ele será sempre uma inspiração.

A Rodrigo Vasconcelos pelos ensinamentos que contribuíram de forma grandiosa o desenvolvimento do trabalho, no qual, no momento em que tive dúvidas ele não se opôs a me ajudar.

A Raimundo Parente pelas contribuições e pelas dúvidas tiradas que somaram muito no trabalho, sendo de fundamental importância.

As instituições que viabilizaram financeiramente a realização do meu trabalho, primeiro a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), instituição financiadora que concedeu a bolsa para a realização do meu Mestrado, a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (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).

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Centro de Pesquisa Trópico Semiárido (EMBRAPA/CPATSA), instituição a qual foi desenvolvido o trabalho, pelo apoio que me deu com a infraestrutura concebida para a realização da pesquisa, e com o apoio logístico com os trabalhos de campo.

A equipe de trabalho da Embrapa Semiárido, meus colegas estudantes, serei sempre grato a Joabe pelos trabalhos de campo realizados, e por estar sempre

disponível para ajudar, e a toda equipe de técnicos, bolsistas e mestrandos: Leide, Geovane, Joana, Hérica e Thiago, que também fizeram parte de tudo isso. Muito obrigado a todos.

Aos professores (a) do PPGM Majorie, Thaise, Uchôa, Washington, William Joselisa pelas cobranças, conselhos, ensinamentos e por estarem sempre prontos a ajudar. A funcionária do PPGM Camilla pela atenção e boa vontade sempre em ajudar no momento em que eu precisei.

Aos meus colegas do curso de mestrado, Sarah, Anderson, Danilo, Janderson, Tamires, Priscila, Iranéia, Monise e Maurício, dentre outros que participaram dessa jornada. Muito obrigado por acompanhar e fazer parte da minha trajetória acadêmica, pelo companheirismo não só nos momentos de alegria, como também nos momentos difíceis, pelo aprendizado que tive com eles trocando conhecimentos, enfim, muito obrigado pelo carinho e pela receptividade de vocês, nunca vou esquecer todos os momentos vividos aí.

A todos os colegas que fiz nesse período de curso, que amenizaram muito a saudade que tive da minha casa.

Muito obrigado a todos!

## RESUMO

Há uma grande necessidade no desenvolvimento de sistemas mais eficazes para o monitoramento da dinâmica do carbono atmosférico, para que haja uma melhor compreensão das interações entre a biosfera e a atmosfera. No entanto, é fundamental que essas tecnologias possuam alta cobertura e um baixo custo. Na vegetação, o processo de geração de biomassa por meio da fotossíntese é um fator determinante na forma como uma área vegetada irá aparecer radiometricamente nas imagens de satélite, portanto, o sensoriamento remoto vem a ser uma alternativa para o monitoramento dessa dinâmica, por ter uma alta cobertura e possuir um baixo custo. O objetivo deste trabalho é analisar, por meio de sensoriamento remoto multiespectral, a dinâmica dos fluxos de CO<sub>2</sub> no Bioma Caatinga, verificando o potencial das imagens multiespectrais na detecção dos fluxos de CO<sub>2</sub> em áreas de Caatinga preservada e em estado de regeneração. O estudo foi desenvolvido em áreas de Caatinga no município de Petrolina-PE e Araripina-PE, áreas monitoradas por estações micrometeorológicas. A metodologia adotada foi a partir da modelagem do Índice de Sequestro Florestal de Carbono (CO<sub>2</sub>flux) que mede a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação, e que propõe a integração do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com o Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI). Foram utilizadas, para a base de dados, 22 cenas multiespectrais do sensor OLI (Landsat-8) juntamente com dados meteorológicos medidos em campo, a fim de verificar a relação entre as variáveis analisadas. Os resultados mostraram que a vegetação da Caatinga tem variações sazonais nos fluxos de CO<sub>2</sub> nas regiões com diferentes tipos de vegetação. O índice CO<sub>2</sub>flux pode ser aplicado para a determinação dos fluxos de CO<sub>2</sub>, apresentando melhores ajustes quando os dados de CO<sub>2</sub> são comparados utilizando a leitura de 1 pixel na imagem, mostrando ser mais eficiente em relação a análise com as áreas de influência (*footprint*) em relação aos pontos amostrais, no entanto, os dados de *footprint* apresentaram também correlações significativas. Portanto, baseado nos modelos espectrais de vegetação foi possível determinar a dinâmica dos fluxos de CO<sub>2</sub> em áreas de Caatinga preservada e em estado de regeneração utilizando dados extraídos de sensores multiespectrais.

**Palavra-Chave:** Bioma Caatinga, Fluxos de Carbono, Sensoriamento Remoto multiespectral

## **ABSTRACT**

There is a great need for the development of more efficient systems for monitoring the dynamics of atmospheric carbon so that there is a better understanding of the interactions between the biosphere and the atmosphere. However, it is critical that these technologies have high coverage and low cost. In the vegetation, the process of biomass generation through photosynthesis is a determining factor in the way a vegetated area will appear radiometrically in the satellite images, therefore, the remote sensing becomes an alternative to the monitoring of this dynamics, having a High coverage and have a low cost. The objective of this work is to analyze the dynamics of CO<sub>2</sub> fluxes in the Caatinga Biome by means of multispectral remote sensing, verifying the potential of multispectral images in the detection of CO<sub>2</sub> fluxes in areas of preserved Caatinga and in a regenerated state. The study was carried out in areas of Caatinga in the municipality of Petrolina-PE and Araripina-PE, areas that are monitored by micrometeorological stations. The methodology adopted was based on the modeling of the Carbon Forest Sequestration Index (CO<sub>2</sub>flux) that measures the efficiency of the carbon sequestration process by vegetation, and proposes the integration of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) with the Index of Photochemical Reflectance (PRI). For the database, 22 OLI (Landsat-8) multispectral scenes were used together with field-measured meteorological data to verify the relationship between the variables analyzed. The results showed that the vegetation of the Caatinga has seasonal variations in CO<sub>2</sub> flows in regions with different vegetation types. The CO<sub>2</sub>flux index can be applied to determine the CO<sub>2</sub> fluxes, presenting better adjustments when the CO<sub>2</sub> data are compared using the 1 pixel reading in the image, showing to be more efficient in relation to the analysis with the footprint in. However, based on spectral models of vegetation, it was possible to determine the dynamics of CO<sub>2</sub> flows in areas of preserved Caatinga and in regeneration state using data extracted from multispectral sensors.

**Keyword:** Caatinga Biome, Carbon Fluxes, Multispectral Remote Sensing

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CO <sub>2</sub> flux	Índice de Sequestro Florestal de Carbono
CPATSA	Centro de Pesquisa do Trópico Semiárido
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENVI	<i>Environment for Visualizing Images</i>
Footprint	Área de influência das Torres
GMT	Horário médio de Greenwich
IRGA	Analisador de Gás Infravermelho
IPA	Instituto Agrônomo de Pernambuco
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NEE	Troca líquida de CO <sub>2</sub>
ND	Números digitais
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
PRI	Índice de Reflectância Fotoquímica
PPGM	Programa de Pós-Graduação em Modelagem
sPRI	Índice de Reflectância Fotoquímica reescalado para valores positivos
UEFS	Universidade Estadual de Feira de Santana

## LISTA DE SIMBOLOS

CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
g C	Gramas carbono
ha	Hectare
H <sub>2</sub> O	Água/ Vapor d'agua
Gt	Giga tonelada
Km <sup>2</sup>	Quilômetro quadrado
M	Metros
Mm	Milímetros
Ppmv	Partes por milhão do volume
O <sub>2</sub>	Oxigênio
°C	Graus Celsius
Pg C	Pentagrama Carbono
Pg C ano <sup>-1</sup>	Pentagrama carbono por ano
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação
μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	Micromol por metros ao quadrado por segundo

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo do carbono e seus diferentes compartimentos com valores em seus estoques e seus fluxos .....	20
Figura 2: Área do Bioma Caatinga .....	25
Figura 3: Cobertura vegetal e uso das terras do Bioma Caatinga .....	28
Figura 4: Fluxograma Metodológico .....	32
Figura 5: Localização das torres micrometeorológicas .....	33
Figura 6: Imagens da área de Caatinga preservada .....	34
Figura 7: Imagens da área de Caatinga em regeneração .....	35
Figura 8: Médias diárias do fluxo de CO <sub>2</sub> em áreas mensuradas por meio de um sensor instalado na torre micrometeorológica nas áreas de Caatinga .....	42
Figura 9: Fluxo diário de CO <sub>2</sub> na área de caatinga preservada em período chuvoso .....	44
Figura 10: Precipitação pluviométrica mensal total de 2013 a 2015 na área de Caatinga preservada .....	44
Figura 11: Flutuação dos dados de fluxo de CO <sub>2</sub> e suas observações .....	46
Figura 12. Ajustes do índice CO <sub>2</sub> flux com dados de fluxo de CO <sub>2</sub> .....	48
Figura 13: Direção dos ventos e percurso dos fluxos de CO <sub>2</sub> .....	52
Figura 14: Média da distribuição de frequência da direção dos ventos e percurso dos fluxos em relação as torres micrometeorológicas das áreas de estudo .....	53
Figura 15: Área de <i>footprint</i> das torres micrometeorológicas .....	54
Figura 16: Ajuste para remoção de pixels de nuvens do <i>footprint</i> .....	56
Figura 17: Padrão sazonal do índice CO <sub>2</sub> flux para a caatinga preservada .....	57
Figura 18: Padrão sazonal do índice CO <sub>2</sub> flux <i>footprint</i> para a caatinga em regeneração .....	60

Figura 19: Modelagem de Fluxo de CO <sub>2</sub> na região de Petrolina - PE no Vale do São Francisco .....	65
Figura 20: Modelagem de Fluxo de CO <sub>2</sub> na região de Araripina - PE na Chapada do Araripe .....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Datas e horários de passagem do sensor OLI nas áreas de estudo.	37
Tabela 2: Teste de Normalidade .....	50
Tabela 3: Teste de Similaridade.....	51
Tabela 4: Ajuste para remoção de pixels de nuvens do <i>footprint</i> .....	55
Tabela 5: Teste de Normalidade .....	62
Tabela 6: Teste de Similaridade .....	63

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	15
2. OBJETIVOS .....	18
2.1. Geral .....	18
2.2. Específicos .....	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
3.1. Ciclo do Carbono .....	19
3.2. Fluxo de CO <sub>2</sub> , Sequestro e Estoque de Carbono .....	21
3.3. Bioma Caatinga .....	24
3.4. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação .....	29
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	31
4.1. Área de estudo .....	33
4.1.1. Estações experimentais e sua caracterização .....	33
4.1.2. Estação Experimental da Torre 1 .....	33
4.1.3. Estação Experimental da Torre 2 .....	34
4.2. Aquisição de imagens e dados .....	36
4.2.1. Imagens .....	36
4.2.2. Dados de campo .....	37
4.3. Pré-Processamento digital das imagens .....	39
4.3.1. Conversão de ND para Radiância .....	39
4.3.2. Correção Atmosférica .....	39
4.4. Processamento digital das imagens .....	39
4.4.1. Determinação dos Índices de Vegetação.....	39
4.5. Análise Estatística .....	41

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	41
5.1. Medição e análises dos Fluxo de CO <sub>2</sub> .....	41
5.2. Análise dos fluxos de CO <sub>2</sub> por meio do índice CO <sub>2</sub> flux .....	47
5.3. Análise espacial ( <i>footprint</i> ) dos fluxos de CO <sub>2</sub> por meio do índice CO <sub>2</sub> flux .....	52
5.4. Modelagem de Fluxo de CO <sub>2</sub> para as áreas de Caatinga preservada e em regeneração .....	63
6. CONCLUSÕES .....	67
REFERENCIAS .....	68

## 1. INTRODUÇÃO

O ciclo do carbono é um dos ciclos biogeoquímicos mais importantes, nele ocorrem vários processos, dentre eles, destaca-se a atividade fotossintética da vegetação. De acordo com Majerowich (2008), a atividade fotossintética das plantas, das algas e de algumas bactérias promovem a conversão da luz solar em moléculas orgânicas ricas em energia, a partir de moléculas inorgânicas, como CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O.

Apenas esses tipos de organismos, os produtores primários, têm a capacidade de transformar de energia luminosa em energia química, aumentando a energia livre disponível para os seres vivos (MAJEROWICH, 2008). Nesse processo, as plantas sendo aquáticas ou terrestres, absorvem gás carbônico e o transformam em tecido vivo liberando oxigênio para a atmosfera (CERQUEIRA & FRANCA-ROCHA, 2007). Assim, o oxigênio liberado nada mais é do que um subproduto das reações fotossintéticas.

O processo de geração de biomassa por meio da fotossíntese será determinante na forma em como a folha ou um dossel vegetal irá aparecer radiometricamente nas imagens de sensoriamento remoto (JENSEN, 2009).

Meneses (2012) define o Sensoriamento Remoto como a obtenção de imagens dos objetos na superfície da terra sem que haja contato físico entre o sensor e o objeto. Para Carvalho Junior e colaboradores (2002) é uma técnica que permite adquirir informações e proporcionar o seu aprimoramento.

Segundo Epiphany e colaboradores (1996), as aplicações de sensoriamento remoto têm se espalhado pelos mais diversos campos do conhecimento, e isso se deve a facilidade de acesso a dados e informações de sensores remotos, à disponibilidade de equipamentos adequados ao processamento dessas informações e também à crescente necessidade de compreender os diversos sistemas que compõe a terra.

Entre as tecnologias do sensoriamento remoto estão os sensores multiespectrais, que são instrumentos que possuem a capacidade de obter múltiplas imagens simultâneas da superfície terrestre no espectro óptico, desde o comprimento de onda da luz visível até a região termal (MENESES, 2012).

Estudos realizados por Rahman e colaboradores (2000; 2001), Baptista e colaboradores (2003; 2004); Fuentes e colaboradores (2006), Grilo e colaboradores (2011) e Pedroza da Silva & Baptista (2015), vêm contribuindo para a compreensão das relações entre a biosfera e atmosfera, enfocando a medição de fluxos de CO<sub>2</sub> por meio de dados de sensoriamento remoto em diferentes ecossistemas. De acordo com Rodrigues e colaboradores (2013), essas técnicas ainda não são muito exploradas, pois são necessários estudos de correlação entre as medidas *in situ* com as de sensoriamento remoto.

De acordo com Baptista (2003), é possível determinar a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação na fase clara da fotossíntese utilizando a integração de índices de vegetação, como proposto por Rahman e colaboradores (2000), com a integração do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), com o Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI).

As técnicas de sensoriamento remoto são aplicadas em diversos estudos e em vários ambientes, justamente por permitem analisar a superfície sem que haja contato direto com os alvos identificados. Assim, pode ser aplicado em todos os biomas, inclusive na Caatinga.

O Caatinga é um bioma brasileiro, com sua formação ocorrente na maior parte do semiárido, expandindo por todos os estados da Região Nordeste do Brasil (KIILL & CORREA, 2005).

O bioma é composto por diferentes tipos de vegetação, sendo caracterizado por possuir uma vegetação predominantemente xerófila e decídua (SOUZA et al., 2015). Constitui um complexo vegetal rico em espécies lenhosas e herbáceas, sendo as primeiras caducifólias e as últimas anuais, em sua grande maioria (KIILL & CORREIA, 2005).

O bioma ainda apresenta um considerável número de espécies endêmicas (CASTELLETTI et al., 2004). Gusmão e colaboradores (2016), afirmam que atualmente são conhecidos 18 gêneros endêmicos de plantas, que podem ter surgido como forma de adaptação as condições inóspitas do ambiente.

Sua vegetação apresenta porte limitado, na qual, a maioria das plantas não ultrapassa 10 m de altura, com troncos retorcidos, caducifólia e resistente ao

déficit hídrico e temperaturas elevadas (SAMPAIO, 2010). Muitas espécies de plantas perdem suas folhas no período seco, e apresentam intensa floração nos períodos chuvosos (GUSMÃO et al., 2016).

As espécies de animais existentes se adaptam as condições áridas de forma fisiológica, por meio da capacidade de assimilar água e reduzir a transpiração, bem como adaptações comportamentais como hábitos crepusculares e noturnos (KIILL & CORREA, 2005).

A Caatinga apresenta em sua maioria, clima semiárido (SAMPAIO, 2010), com temperaturas médias anuais de 27°C (GUSMÃO et al., 2016), com duas estações bem distintas durante o ano: uma estação chuvosa e outra seca, com regime pluviométrico muito irregular (MAIA, 2004).

Por ter ocorrência de secas, as regiões semiáridas aparentam ser uma região homogênea, no entanto, suas diferenças físicas, climáticas e ambientais, mostram uma realidade muito mais complexa, como pode ser percebido em suas regiões naturais: Sertão, Seridó, Caatinga, Cariris Velhos, dentre outros (ROCHA et al., 2011).

Castelleti e colaboradores (2004), apontam que a Caatinga tem sido muito modificada pelo homem, sendo considerado o terceiro bioma mais antropizado do Brasil, ultrapassado pela Floresta Atlântica e Cerrado. De acordo com Pires (2015), há uma carência de informações ao se tratar, por exemplo, do tempo de regeneração ou recuperação que uma área que sofreu antropização pode levar, sabendo que essa recuperação se dá por meio de variáveis como a dinâmica do clima, associado a fluxos de CO<sub>2</sub> e outros elementos microclimáticos que auxiliam na compreensão dessa dinâmica da recuperação de espécies em áreas degradadas.

Portanto, há um grande interesse no desenvolvimento de sistemas eficazes para o monitoramento da dinâmica da vegetação para que haja uma melhor compreensão das interações entre a biosfera e a atmosfera.

É muito importante a compreensão de como ocorrem as trocas de carbono entre a atmosfera e os ecossistemas, e existem vários métodos para a mensuração dessa dinâmica.

O monitoramento dos fluxos de CO<sub>2</sub> em florestas normalmente é realizado por meio de procedimentos meteorológicos, sendo um método eficiente e muito utilizado, porém, de alto custo. Há a necessidade de monitorar essas e outras dinâmicas em sistemas maiores (grandes áreas) sem instrumentação em campo e com baixo custo. Portanto, é fundamental que essas tecnologias tenham uma alta cobertura e um baixo custo.

O sensoriamento remoto vem atender a essa necessidade, sendo a alternativa para o monitoramento da vegetação e de sua dinâmica. Nas suas aplicações estão os índices de vegetação, e por meio deles, analisamos as condições biofísicas da vegetação. Rahman e colaboradores (2000; 2001) apontam que o sensoriamento remoto fornece um método para explorar padrões espaciais de fluxos de CO<sub>2</sub>, sendo possível medir o sequestro de carbono em ecossistemas por meio da integração de índices de vegetação.

O uso do sensoriamento remoto aliado a dados medidos *in situ*, podem proporcionar um refinamento nos resultados relacionados ao sequestro de carbono nos ecossistemas, como mostrado nos estudos de Rahman e colaboradores (2000; 2001), Fuentes e colaboradores (2006) e Pedroza da Silva & Baptista (2015), entretanto, em ambientes semiáridos com as características do Bioma Caatinga no Brasil ainda não existem estudos e análises por meio desses métodos.

Portanto, é necessário desenvolver estudos utilizando técnicas de sensoriamento remoto que visem a criação de modelos que permitam visualizar o espaço estudado como um todo, inferindo sobre os processos biofísicos da vegetação por meio da interação que ocorre entre a energia eletromagnética e o alvo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Geral**

Analisar, por meio de sensoriamento remoto multiespectral, o fluxo de CO<sub>2</sub> no Bioma Caatinga, verificando o potencial das imagens multiespectrais na detecção do sequestro de carbono em um ambiente de Caatinga preservada e outro em regeneração.

## **2.2. Específicos**

Avaliar a variação sazonal dos fluxos de CO<sub>2</sub>, de acordo com os modelos espectrais de vegetação da Caatinga nos municípios de Petrolina-PE e Araripina-PE, correlacionando com medições feitas em campo com estações micrometeorológicas.

Verificar o efeito da modelagem de sequestro florestal de carbono no pixel correspondente à torre, bem como na sua área de influência, ou *footprint*.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1. Ciclo do Carbono**

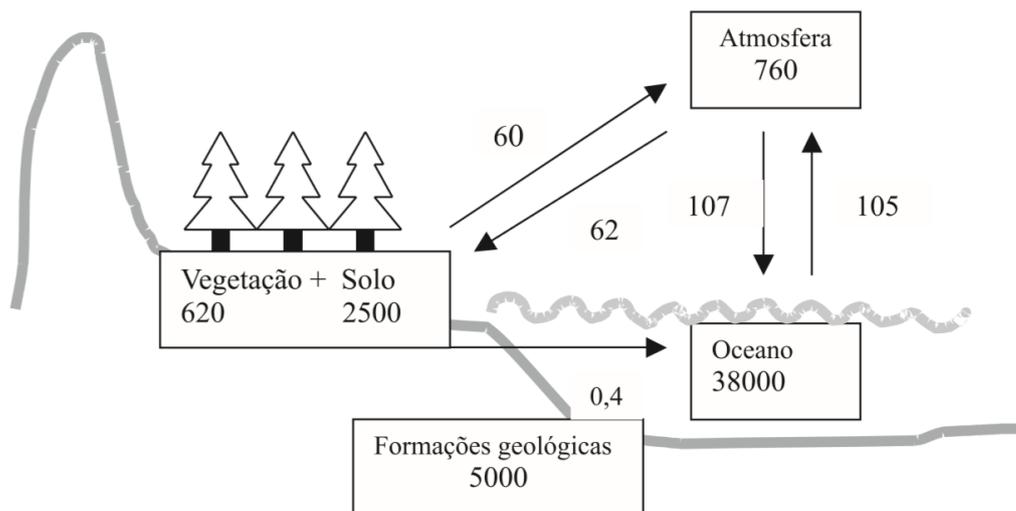
O ciclo do carbono é um dos ciclos biogeoquímicos mais importantes que existem, pois, por meio dele ocorre a interação do O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, os quais são elementos essenciais para a vida.

De acordo com DellaSalla (2013), o carbono é um bloco de construção básico da vida na Terra, que está nas células, nos oceanos, nas florestas, atmosfera e em algumas rochas. Esse autor acrescenta que o carbono é parte da estrutura molecular de proteínas, contribui no processo de fotossíntese, combina com outros elementos (hidrogênio, oxigênio, nitrogênio) formando moléculas que participam dos processos que sustentam a vida.

O carbono se constitui como o quarto elemento em abundância na natureza (GRILO, 2012), sendo o elemento “mestre” dos ciclos biogeoquímicos (PEDROZA DA SILVA, 2014), no qual, o mesmo é composto de vários ciclos menores e complexos, e dentre esses, o mais importante é o processo de fotossíntese-respiração (CERQUEIRA & FRANCA-ROCHA, 2007).

De acordo com Machado (2005), o carbono na Terra possui quatro principais compartimentos, que são os oceanos, formações geológicas, ecossistemas terrestres e atmosfera, sendo os oceanos o maior desses compartimentos, como ilustrado na figura 1.

**Figura 1:** Ciclo do carbono e seus diferentes compartimentos com valores em seus estoques em (Pg C= 10<sup>15</sup> g C) e seus fluxos em (em Pg C ano<sup>-1</sup>). Fonte: Machado, 2005.



De acordo com Machado (2005) (figura 1), o oceano, sendo o maior compartimento de carbono na Terra, possui 38.000 Pg C, seguido das formações geológicas com 5.000 Pg C, do solo com 2.500 Pg C, sendo esse o maior estoque entre nos ecossistemas terrestres. Esse autor também afirma que pouco se sabe sobre a quantidade perdida do solo para a atmosfera.

Analisando os estoques de carbono no planeta, um estudo de Lemos e colaboradores (2010) mostra que 80 mil Gt do estoque de carbono é terrestre e formado por rochas, carbonatos, carvão mineral e parte está armazenada nas florestas, nas quais servem como sumidouros de carbono; 42 mil Gt de carbono estão estocados nos oceanos e 740 Gt de carbono na atmosfera, sendo que a quantidade de carbono estocado na atmosfera se apresenta inferior aos demais valores, porém, ressalta que pequenas variações no fluxo podem gerar grandes variações no estoque (LEMOS et al., 2010). Para Pimentel (2011), os oceanos, com o seu “bombardeamento biológico”, absorvem mais CO<sub>2</sub> antropogênico em relação a parte terrestre, na qual, na década de 1990, a biota marinha foi responsável por sequestrar 48% do CO<sub>2</sub> emitidos por meio da queima de combustíveis fósseis.

Nos ecossistemas terrestres, a absorção de CO<sub>2</sub> da atmosfera ocorre de forma bem dinâmica. De acordo com Falkowski e colaboradores (2000), no processo de absorção o CO<sub>2</sub> é capturado da atmosfera e o armazenado na matéria

orgânica, retornando para atmosfera por meio de vias respiratórias, que operam em diferentes escalas de tempo, sendo devolvido por meio da respiração de plantas e animais, decomposição e combustão de materiais orgânicos.

As florestas têm um importante papel na absorção do CO<sub>2</sub> atmosférico, no qual, sem elas, os teores de CO<sub>2</sub> aumentariam, portanto, armazenando carbono na vegetação em vários ecossistemas em longos períodos é vital, não só para o balanço global de carbono, mas para um ambiente seguro (DELLASALA, 2013). No entanto, a prática de derrubada das áreas vegetadas influencia fortemente na perda da cobertura vegetal existente, gerando redução da vegetação nativa das áreas, contribuindo futuramente com as mudanças climáticas locais.

### **3.2. Fluxo de CO<sub>2</sub>, Sequestro e Estoque de Carbono**

Segundo Aguiar (2006), o carbono é assimilado pela biosfera por meio da fotossíntese e liberado para a atmosfera por meio da respiração autotrófica, heterotrófica, fotorrespiração e nos processos de decomposição.

A fotossíntese de acordo com Marengo e colaboradores (2014) é o mecanismo pelo qual as plantas e algumas bactérias sintetizam compostos orgânicos utilizando a luz como sua fonte de energia. Nesse processo, moléculas oxidadas e com baixo conteúdo de energia são transformadas em moléculas com elevado poder redutor e conteúdo de energia, e no processo, os elétrons são impulsionados pela luz para níveis mais elevados de energia caracterizando um processo termodinâmico não espontâneo (MAJEROWICH, 2008).

Parte do carbono absorvido retorna para a atmosfera e outra parte permanece acima ou abaixo do solo na forma de biomassa viva ou morta, considerando um reservatório de carbono, no qual, uma fração da biomassa morta é incorporada no solo na forma de húmus, aumentando ainda mais esse estoque de carbono (LEITE et al., 2010).

De acordo com Silva Junior e colaboradores (2004), esse processo de absorção não é equilibrado, o seu resultado irá depender de outros processos ocorrentes, nos quais podem ser responsáveis pelo controle da produção ou absorção líquida de CO<sub>2</sub>, como exemplo, uma queimada, que certamente irá aumentar a concentração de CO<sub>2</sub>, e um reflorestamento que irá diminuir essa concentração.

A produção de massas vegetais em uma comunidade ocorre por meio da assimilação do CO<sub>2</sub>, do índice de área foliar e do tipo de folha, e esse mecanismo está relacionado à transpiração da planta, portanto, o CO<sub>2</sub> é consumido durante o dia e liberado por meio do mecanismo de respiração da planta, e seu teor fixado será de acordo com a composição florística e estrutura da população de cada estrato por comunidade composto na biomassa (CERQUEIRA & FRANCA-ROCHA, 2007).

Quando o carbono é removido da atmosfera, ocorre o que se denomina de “sequestro de carbono”, no qual ocorrem vários processos, dentre eles, a absorção do CO<sub>2</sub> pelos oceanos via processos físico-químicos ou biológicos, ou por difusão simples, e a fotossíntese que já é um processo natural da vegetação (SILVA et al., 2012).

As florestas tropicais são maiores armazenadoras de carbono por serem plantas com longo período de vida e com longos intervalos entre grandes perturbações, a exemplo, os incêndios florestais, onde parte do carbono é devolvido para a atmosfera por meio da respiração de forma mais rápida e por meio da decomposição de forma mais lenta, sendo maioria armazenada na planta (DELLASALA, 2013).

Ao se tratar de sequestro de carbono, há um interesse maior voltado para as florestas tropicais úmidas, como exemplo, as existentes no Brasil, nas quais, existe alta produção primária, por meio da retenção de carbono da atmosfera extraídas durante a sua fase de crescimento (CHANG, 2002), no entanto, existe a necessidade de compreender essa dinâmica em outros biomas, a exemplo da Caatinga, que apesar de ser uma estrutura diferente se comparado ao de florestas tropicais úmidas, possui um alto potencial em retenção de carbono em função da alta atividade fotossintética da vegetação quando há disponibilidade de água.

Os fluxos de CO<sub>2</sub> são de grande importância ao se tratar do ciclo de carbono, em particular no que diz respeito à mudança de uso da terra, e se tratando de ecossistema, são fortemente regulados pela cobertura vegetal, de modo que a mudança do uso da terra e o manejo da agricultura afetam diretamente a dinâmica dos fluxos (FLEISCHER et al., 2016).

A intensidade dos fluxos de CO<sub>2</sub> dos ecossistemas terrestres depende tanto da cobertura vegetal como do estado fisiológico da vegetação (RAHMAN et al., 2001), e varia de um bioma para outro, dependendo das suas características, onde normalmente, os maiores fluxos esperam-se encontrar nas florestas tropicais úmidas (AGUIAR et al., 2006).

Em ambientes semiáridos, os maiores fluxos de carbono têm uma relação com atividades antrópicas, como exemplo, a prática de derrubada e queima da Caatinga para a formação de roçados e pastos, e da regeneração da vegetação nativa em áreas nas quais essas práticas de manejo deixaram de ser desenvolvidas (SAMPAIO e COSTA, 2011).

Oliveira e colaboradores (2006), realizando medições de fluxos de CO<sub>2</sub> em área de Caatinga, identificaram que o comportamento dos fluxos mostrou que, em períodos chuvosos, as taxas de CO<sub>2</sub> chegaram a  $-30 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , com os valores médios em torno de  $-9 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , sendo esses valores negativos, indicadores de taxa de absorção de CO<sub>2</sub> pela vegetação (fotossíntese), o que vem a mostrar uma alta atividade fotossintética nessa região nos períodos chuvosos.

Silva (2015), analisando o comportamento de fluxos de CO<sub>2</sub> em Caatinga e Pastagem, identificou que no período seco houve um comportamento semelhante no fluxo de CO<sub>2</sub> entre os distintos ambientes, e no período diurno, a fotossíntese se mostrou maior que a respiração, sendo que a noite o comportamento é inverso. Já no período chuvoso, identificou que nas primeiras horas do dia, a pastagem emitia mais CO<sub>2</sub> que a caatinga, ocorrendo também o inverso no período noturno.

Pires (2015), analisando o fluxo de CO<sub>2</sub> em Caatinga degradada, constatou que os fluxos naquela região dependem do regime de chuvas ocorrentes em períodos anteriores, apresentando a área como emissora de CO<sub>2</sub> para a atmosfera em períodos secos e um sumidouro de carbono em períodos chuvosos.

Com relação aos estoques de carbono na vegetação da Caatinga, Sampaio e Costa (2011) afirmam que áreas cobertas por vegetação nativa de Caatinga arbustiva e arbórea possui um estoque de biomassa maior em relação as áreas

cobertas com vegetação herbácea, como exemplo, pastagens abertas, e maior que as áreas plantadas com culturas de ciclo curto.

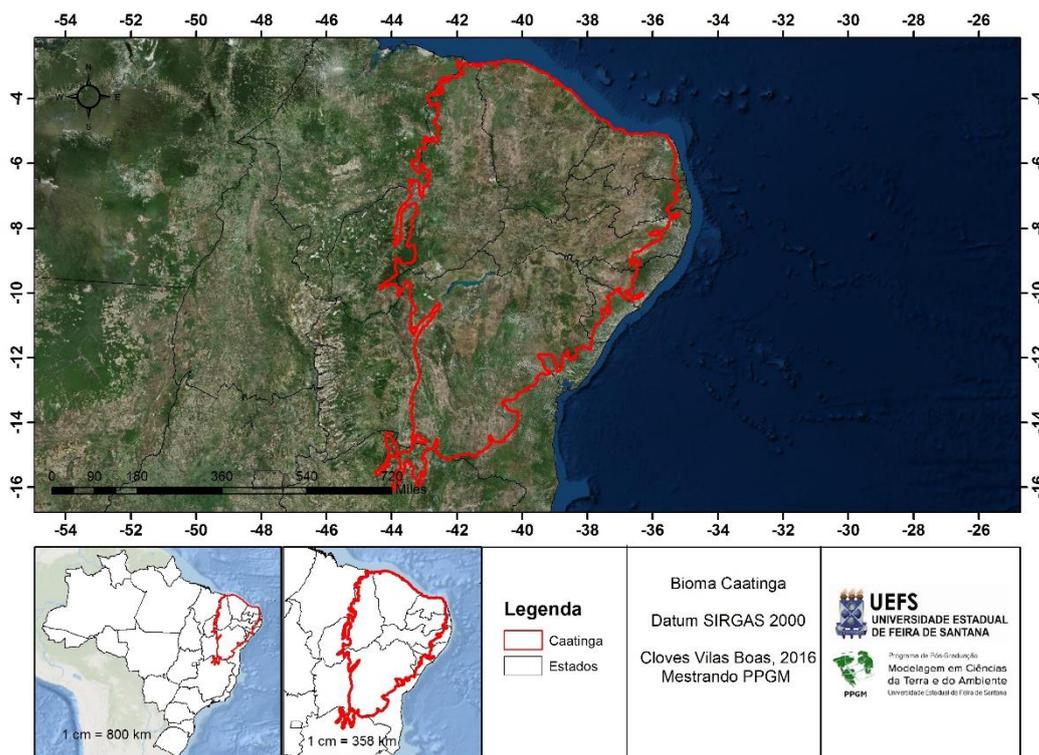
### **3.3. Bioma Caatinga**

O Bioma Caatinga (Figura 2) tem sua denominação originada da língua indígena Tupi-Guarani, que significa “Mata Branca” (MAIA, 2004; PEREIRA & PEREIRA, 2011; GUSMÃO et al., 2016). É um bioma único, e o mais representativo do semiárido tropical brasileiro (GIONGO et al., 2011), que representa um patrimônio biológico para a região Semiárida Brasileira. A região da Caatinga é considerada um grande potencial para o desenvolvimento de atividades produtivas, apesar dos baixos índices pluviométricos ocorrentes (VIEIRA et al., 2009).

A Caatinga possui uma extensão territorial de 844.453 km<sup>2</sup>, o equivalente a 11% do território brasileiro, compreendendo quase os 980 km<sup>2</sup> da região Semiárida (GUSMÃO et al., 2016), e cerca de 63% da região Nordeste (OLIVEIRA et al., 2006), sendo uma região conhecida pela predominância de características semiáridas, por meio da grande variabilidade espacial e temporal dos períodos de ocorrência de precipitação intercalando anos chuvosos e secos (ROCHA et al., 2011).

De acordo com a figura 2, o bioma ocupa praticamente todo o estado do Ceará com quase 100% do território, Rio Grande do Norte (95%), Paraíba (92%), Pernambuco (83%), Piauí (63%), Bahia (54%), Alagoas (48%) e Sergipe (49%), além de uma pequena parte ao norte de Minas Gerais ocupando 2% e 1% do estado do Maranhão (BRASIL, 2011).

**Figura 2:** Área do Bioma Caatinga.



A caatinga apresenta características climáticas bem distintas em relação a outros biomas. O clima é classificado como Bsh de acordo com Köppen, ou seja, clima semiárido muito quente, com pluviometria escassa e chuvas distribuídas irregularmente (JACOMINE, 1996).

De acordo com Oliveira e colaboradores (2006), a região possui forte irregularidade climática, na qual, possuem os valores meteorológicos mais altos do país: forte insolação, baixa nebulosidade, altas médias térmicas, elevadas taxas de evaporação e os mais baixos índices pluviométricos. As chuvas são irregulares e concentradas em 2 a 3 meses do ano, ocorrendo, por vezes, chuvas mais intensas (120 a 130 mm) num período de 24 horas, porém, os períodos secos são de 6 a 8 meses, e podem atingir até 11 meses em áreas com aridez mais acentuada (JACOMINE, 1996).

Os totais de chuva são muito variáveis de ano para ano, e em intervalos de 10 a 20 anos, caem a menos de metade da média, podendo ocorrer durante 3 a 5 anos seguidos períodos de estiagem que normalmente chamamos de “seca”, em sua maioria ocorrendo em regiões ao norte do Rio São Francisco, em função do período de chuvas ser muito irregular (VELLOSO et al., 2002).

Em função dessa irregularidade de chuvas na caatinga, a produção de biomassa nessas áreas apresenta grandes variações, tanto espaciais como ao longo do ano (LIMA JÚNIOR et al., 2014).

Com relação a vegetação, suas áreas nativas cobrem cerca de 40% da área original no semiárido nordestino (SAMPAIO, 2010; SAMPAIO & COSTA, 2011; LIMA JÚNIOR et al., 2014).

O Bioma Caatinga é composto por diferentes “Caatingas”. De acordo com Rocha e colaboradores (2011), são reconhecidos 12 tipos diferentes de caatinga composta por uma grande diversidade de espécies vegetais, muitas das quais endêmicas ao Bioma. Possui um dos tipos vegetacional mais complexos, na qual, são caracterizadas com florestas arbóreas (8 a 12 metros) ou arbustivas (2 a 5 metros), que compreende principalmente árvores e arbustos baixos, muitos apresentando espinhos, microfilia e características xerofíticas (GIONGO et al., 2011).

De acordo com Gusmão e colaboradores (2016), com relação a diversidade biológica que existe na Caatinga, são conhecidas hoje 178 espécies de mamíferos, 975 de aves, 240 de peixes, 177 de répteis, 80 de anfíbios, 221 de abelhas, além de cerca de 6.000 espécies de plantas e mais de 1.000 espécies de fungos. Os autores ainda ressaltam que esses números podem ser ainda maiores.

A caatinga apresenta grande variação fisionômica, principalmente quanto a densidade e ao porte das plantas, onde numa escala local, com poucas dezenas de metros, há uma alteração ambiental claramente identificável, e nesses locais, o maior porte das plantas estão nos vales, e os menores nos lajedos e em solos rasos, associados a uma maior ou menor disponibilidade hídrica (AMORIM et al., 2005).

Sua vegetação é bem definida e adaptada a climas secos, sendo resistentes à perda de água por meio de sistemas foliares de folhas pequenas, que caem no período seco (caducifólias) para reduzir a transpiração e sua perda de água, além de raízes que são bem adaptadas para a absorção da escassa umidade (BRASIL, 2011), porém, possui algumas poucas espécies que não perdem as

folhas em época seca, entre elas, é destacado o juazeiro (*Zizyphus joazeiro*), planta típica do Bioma (ALVES et al., 2009).

De acordo com Trovão e colaboradores (2007), a vegetação da região Semiárida Brasileira é condicionada ao déficit hídrico não apenas pela irregularidade das chuvas, bem como, adicionado a este, os outros fatores característicos da região, como as altas temperaturas, por meio da alta intensidade luminosa, na qual, ocorre uma alta evaporação com consequente dessecação do solo.

Com relação ao relevo, topograficamente, a região é caracterizada por apresentar um relevo variando de plano a ondulado (CORREIA et al., 2011).

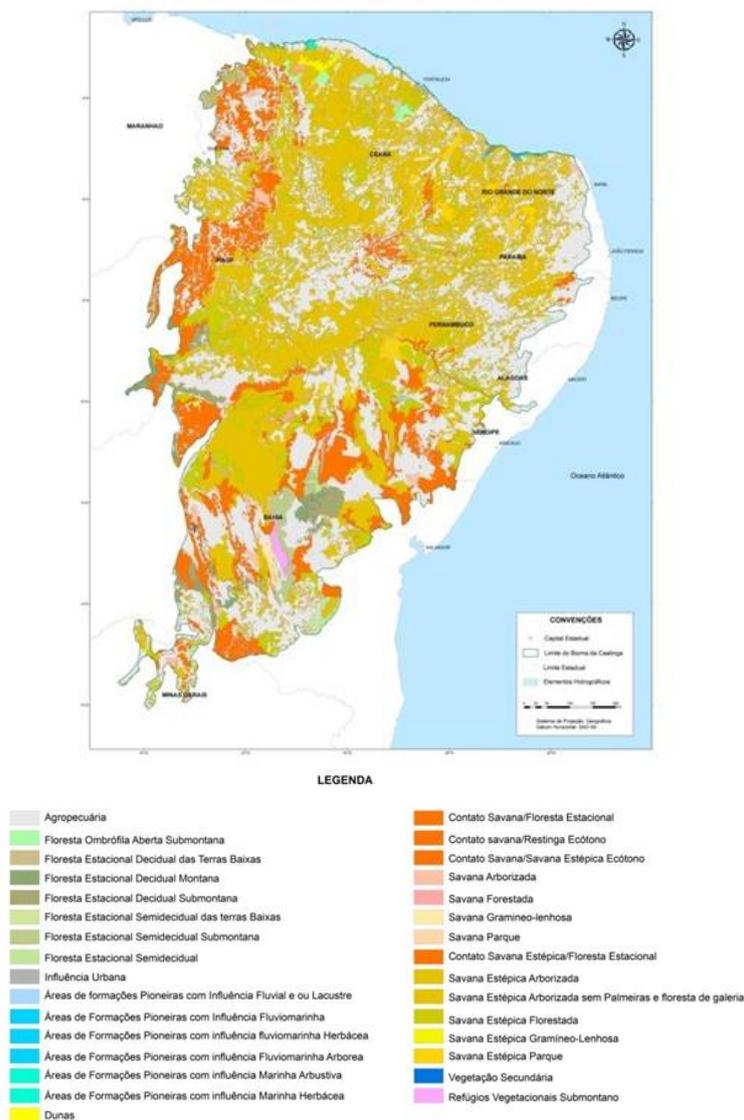
Na região está a Depressão Sertaneja, que possui uma superfície de pediplanação com relevo suave ondulado marcados por cristas e outeiros residuais, as áreas mais elevadas estão no Planalto da Borborema possuindo maciços e outeiros com altitudes normalmente entre 650 e 850 m; no restante da caatinga a predominância é de superfícies com menor extensão como as bacias sedimentares, superfícies cársticas, superfícies dissecadas, tabuleiros costeiros de relevo plano ou suavemente ondulado, baixadas aluviais, além de maciços, serra, serrotes e inselbergs dispersos na região (JACOMINE, 1996).

Além do clima, a geologia e o material de origem tem um grande papel na formação dos solos, em função da variação litológica da região, onde são destacadas áreas do cristalino, com predominância de gnaisses, granitos, migmatitos e xistos; áreas do cristalino recoberta por materiais, alguns mais e outros menos arenosos; e áreas sedimentares com destaque para Holoceno, com sedimentos aluviais e fluvio-marinhos da orla marítima; Cretáceo, com sedimentos de predomínio arenoso; Terciário e coberturas afins, com sedimentos arenosos e areno-argilosos; Devoniano médio e inferior e Siluriano (BRASIL, 1974 *Apud* JACOMINE, 1996).

Os solos dessas regiões semiáridas são de uma distribuição complexa, apresentando diversos tipos, como solos rasos e pedregosos que fazem uma relação à imagem típica de sertão coberto com cactáceas, a solos mais arenosos e profundos onde há grandes vazios demográficos, a exemplo, o Raso da Catarina (VELLOSO et al., 2002).

Com relação as diferentes coberturas do solo da região, ilustrados na figura 3, Sampaio e Costa (2011) apontam que de acordo com o IBGE, os quatro principais usos da terra são com mata nativa, que são áreas com vegetação de porte maior, alta, mais fechada e mais arbórea; pastos nativos com predominância de herbáceas e subarbustos até capoeiras mais densas; pastos plantados com predominância de gramíneas, herbáceas, subarbustos e arbustos invasores por meio de manejo inadequado e lavouras com culturas de ciclo curto.

**Figura 3:** Cobertura vegetal e uso das terras do Bioma Caatinga. Fonte: Sá et al. (2010).



Existem poucos cursos d'água no bioma, entre eles está o Rio São Francisco, que de acordo com Gusmão e colaboradores (2016) possui 2.814 km de extensão. Estima-se que 50% da Bacia do São Francisco está localizada dentro

do bioma, nascendo na Serra da Canastra (MG), percorrendo do Sul ao norte da Bahia, Pernambuco, chegando ao oceano atlântico na divisa entre Alagoas e Sergipe, sendo um rio de grande potencial hidrelétrico, e prevalecendo sua maior porção na Bahia, e outra região hidrográfica é a do Parnaíba, que é a segunda mais importante da região Nordeste, sendo considerada a região hidrográfica mais extensa dentre as 25 bacias da Vertente Nordeste, passando pelos estados do Ceará, Maranhão e Piauí (BRASIL, 2011; SAMPAIO, 2010).

### **3.4. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**

A origem do Sensoriamento Remoto ocorreu a partir de 1960. Esse período ficou conhecido como a década da corrida espacial, e até os últimos anos, os avanços continuam e se intensificam. Hoje essas tecnologias de aplicação reúnem um grande número de pesquisadores, sendo empregadas em escala local e mundial (MENESES, 2012).

Nos últimos anos, estudos com sensoriamento remoto vêm sendo utilizados em pesquisas com maior frequência. De acordo com Meneses (2012), o sensoriamento remoto é uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície da Terra por meio da detecção e medição das respostas das interações entre a radiação eletromagnética com os materiais em sua superfície. Para Florenzano (2007), faz o uso da obtenção de imagens e outras informações da superfície da Terra.

Na definição de Jensen (2009), o sensoriamento remoto trata da aquisição de informações nas regiões do ultravioleta, visível, infravermelho e micro-ondas do espectro eletromagnético, sem contato os alvos, e fazendo o uso de instrumentos, tais como câmeras, escâneres, lasers, dispositivos lineares ou matriciais em plataformas como aeronaves ou satélites, sendo que a aquisição, análise e a interpretação da informação seja visual ou por meio de processamento de imagens.

No sensoriamento remoto está a tecnologia que avança rapidamente por meio da evolução dos sensores imageadores, e cada vez mais pela evolução na infraestrutura da informação fornecida por eles, incluindo o processamento e armazenamento (TOTH & JOZKOW, 2015), e nessas tecnologias estão os sensores multiespectrais, que são os instrumentos que obtém imagens múltiplas

e simultâneas da superfície no espectro óptico, desde o comprimento de onda da luz visível até a região termal (MENESES, 2012).

Nas aplicações de sensoriamento remoto estão os índices de vegetação, que, de acordo com Epiphânio e colaboradores (1996), são transformações de bandas espectrais na faixa do vermelho ou infravermelho próximo. Esses índices propostos tem o objetivo de explorar as características biofísicas da vegetação, nas quais normalmente são utilizadas as regiões do visível e do infravermelho próximo (PONZONI & SHIMABUKURO, 2007), sendo importantes para monitorar e quantificar as condições de separação de áreas vegetadas, na qual, são obtidas por combinações matemáticas de refletância nas faixas espectrais (PEDROZA DA SILVA & BAPTISTA, 2015).

Um dos índices de vegetação mais empregados é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) proposto por Rouse e colaboradores (1973), que, ao realçar o contraste da radiação refletida nos intervalos espectrais do vermelho e do infravermelho, no qual, é proporcional a atividade da fotossíntese, favorece uma fácil visualização das diferentes fitofisionomias da vegetação (MASCARENHAS et al., 2009).

O NDVI apresenta a diferença de refletância entre a feição de absorção do vermelho (0,66  $\mu\text{m}$ ) e o aumento do albedo que acontece nos espectros de vegetação após o início do infravermelho próximo (0,80  $\mu\text{m}$ ), enquanto o PRI proposto por Gamon, e colaboradores (1997) apresenta a diferença entre a feição centradas em 0,531  $\mu\text{m}$  e 0,57  $\mu\text{m}$  (BAPTISTA, 2004).

De acordo com Rahman e colaboradores (2000) e Baptista (2003) é possível mensurar a dinâmica de fluxo de  $\text{CO}_2$  por meio de índices de vegetação fazendo o uso do NDVI relacionando-o com o PRI, que são dois índices com diferença normalizada.

Cerqueira e Franca-Rocha (2007) comparando fluxos de carbono com diferentes tipos de vegetação em áreas de Caatinga, por meio de método de quantificação convencional, concluíram que existem diferenças significativas dos tipos de vegetação com relação aos fluxos de  $\text{CO}_2$ , e atribuiu isso ao fato de que cada vegetação possui características fitossociológicas que as diferenciam uma das outras, havendo espécies que possuem maior biomassa que outras, com maior

potencial para fixação de carbono, e sugere que outros trabalhos de quantificação de carbono mais específicos sejam realizados, acreditando que com o uso de dados reais, haverá um maior nível de precisão.

Grilo e colaboradores (2011) analisando o fluxo de carbono em diferentes sistemas em área de Caatinga obteve bons resultados utilizando os índices NDVI e PRI para mapear fluxo de carbono, identificando que em estações secas, por meio do estresse hídrico, os sistemas que possuem água apresentaram maiores fluxo de CO<sub>2</sub> em relação a outros sistemas mais secos, no entanto, ressalta a necessidade de estudos com relação ao comportamento espectral das fitofisionomias da Caatinga para identificar feições associadas ao carbono.

Pedroza da Silva e Baptista (2015) analisando o fluxo e concentração de CO<sub>2</sub> em diferentes ambientes da Amazônia utilizando imagens hiperespectrais com o sensor Hyperion, indicaram que a modelagem pontual de sequestro florestal de carbono em florestas densas podem ser realizadas a partir do índice CO<sub>2</sub>flux, obtendo melhores ajustes tanto em concentração quanto fluxos medidos no topo das torres micrometeorológicas da Amazônia, e obteve boas correlações entre as variáveis analisadas, concluindo que medições diretas de CO<sub>2</sub> no topo das torres são mais eficientes para correlação com índices espectrais, em relação as medições feitas ao longo da torre, e que a associação dos dados de CO<sub>2</sub>flux com os dados de fluxo apresentam melhores ajustes.

Para Silva e colaboradores (2012), é importante compreender como os diversos biomas estão sequestrando carbono, embora existam diversos métodos existentes destinados a mensuração dos estoques de carbono na vegetação, os métodos que empregam sensoriamento remoto junto com dados meteorológicos medidos em superfície se mostram bem atrativos, em função de sua alta cobertura, baixo custo e por não ser destrutivo.

#### **4. MATERIAL E MÉTODOS**

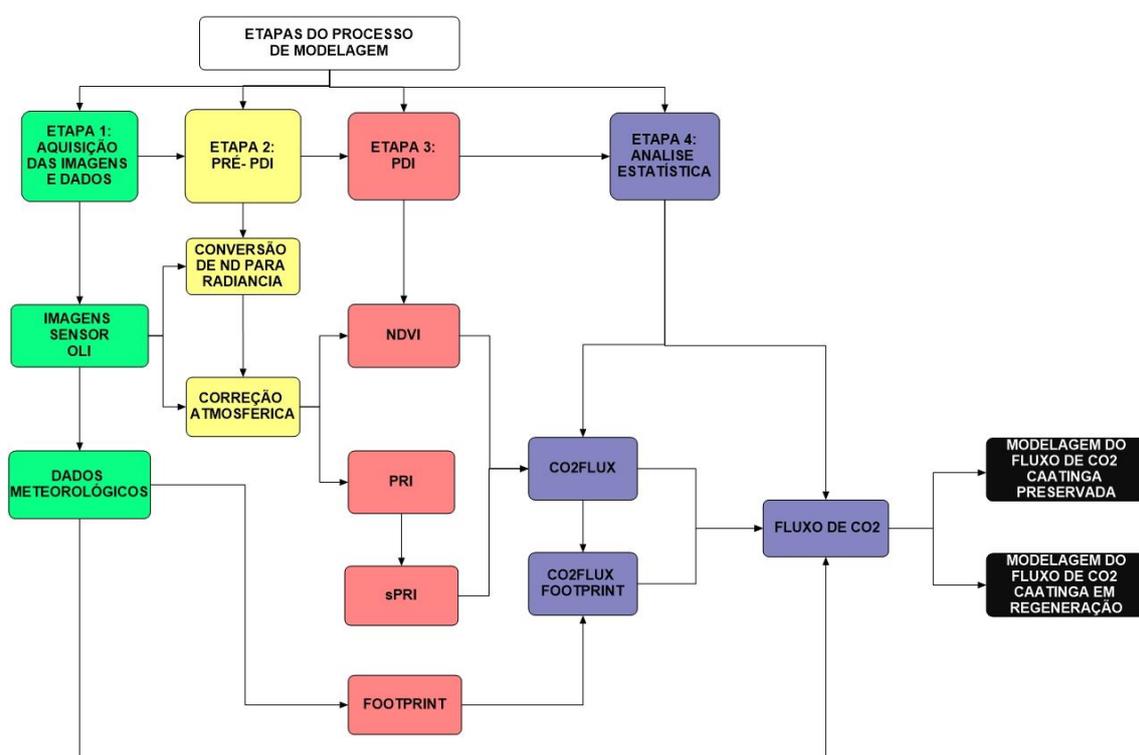
A pesquisa realizada utilizou o método baseado no Índice de Sequestro Florestal de Carbono, no qual, propõe a integração de índices de vegetação para estimar a dinâmica do carbono atmosférico por meio do sensoriamento remoto.

Para o estudo foram adotadas técnicas de processamento digital de imagens para a determinação dos índices propostos na análise, utilizando dados mensurados em campo.

Por meio de métodos estatísticos, foi avaliada a correlação entre as variáveis para ter como resposta aos objetivos de estudo.

As etapas e os procedimentos metodológicos da modelagem utilizados estão descritos no Fluxograma Metodológico exposto na figura 4.

**Figura 4:** Fluxograma Metodológico

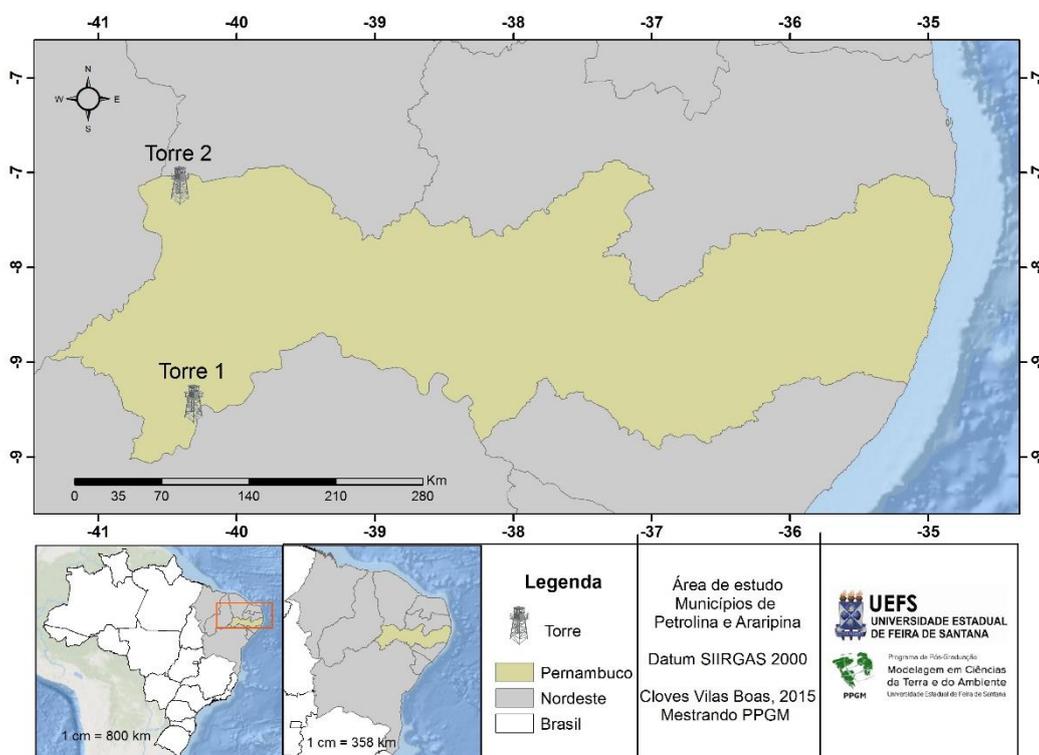


#### 4.1. Área de estudo

O estudo foi realizado em duas áreas de Caatinga, sendo uma com predominância de vegetação preservada e uma em estado de regeneração, nas quais estão presentes as torres micrometeorológicas pertencentes a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Centro de Pesquisa Trópico Semiárido (EMBRAPA/CPATSA), ambas situadas no estado de Pernambuco, como apresentado na figura 5.

##### 4.1.1. Estações experimentais e sua caracterização

**Figura 5:** Localização das torres micrometeorológicas pertencentes a Embrapa Semiárido.



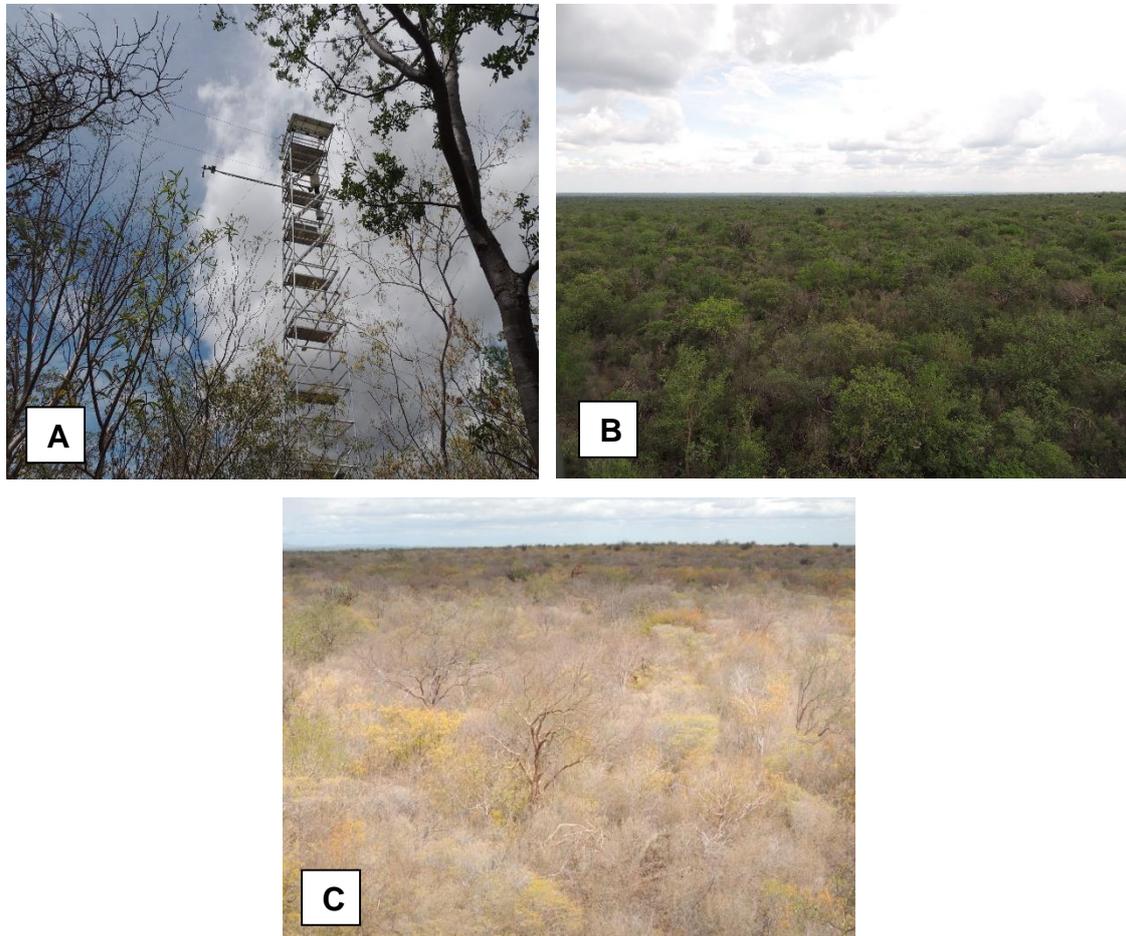
##### 4.1.2. Estação Experimental da Torre 1

A Torre 1 (figura 5) localiza-se em uma área de Caatinga preservada localizada no município de Petrolina (09°02'47 S; 40°19'16 W, 395 m), na região do Vale do São Francisco no estado de Pernambuco.

A região possui um clima, segundo Köppen, do tipo BSw<sup>h</sup>, ou seja, semiárido, a temperatura média anual apresenta-se em torno de 26°C com uma precipitação anual em torno de 510 mm. A área estudada possui relevo plano,

com 600 ha de caatinga preservada, composta por espécies hiperxerófilas de porte arbóreo-arbustivo possuindo aproximadamente 5 m de altura (SOUZA et al., 2015). O solo é classificado como Argissolo Amarelo.

**Figura 6:** Imagens da área de Caatinga preservada. A) Torre 1, B) dossel da caatinga no período chuvoso, e C) dossel da caatinga no período seco.



#### 4.1.3. Estação Experimental da Torre 2

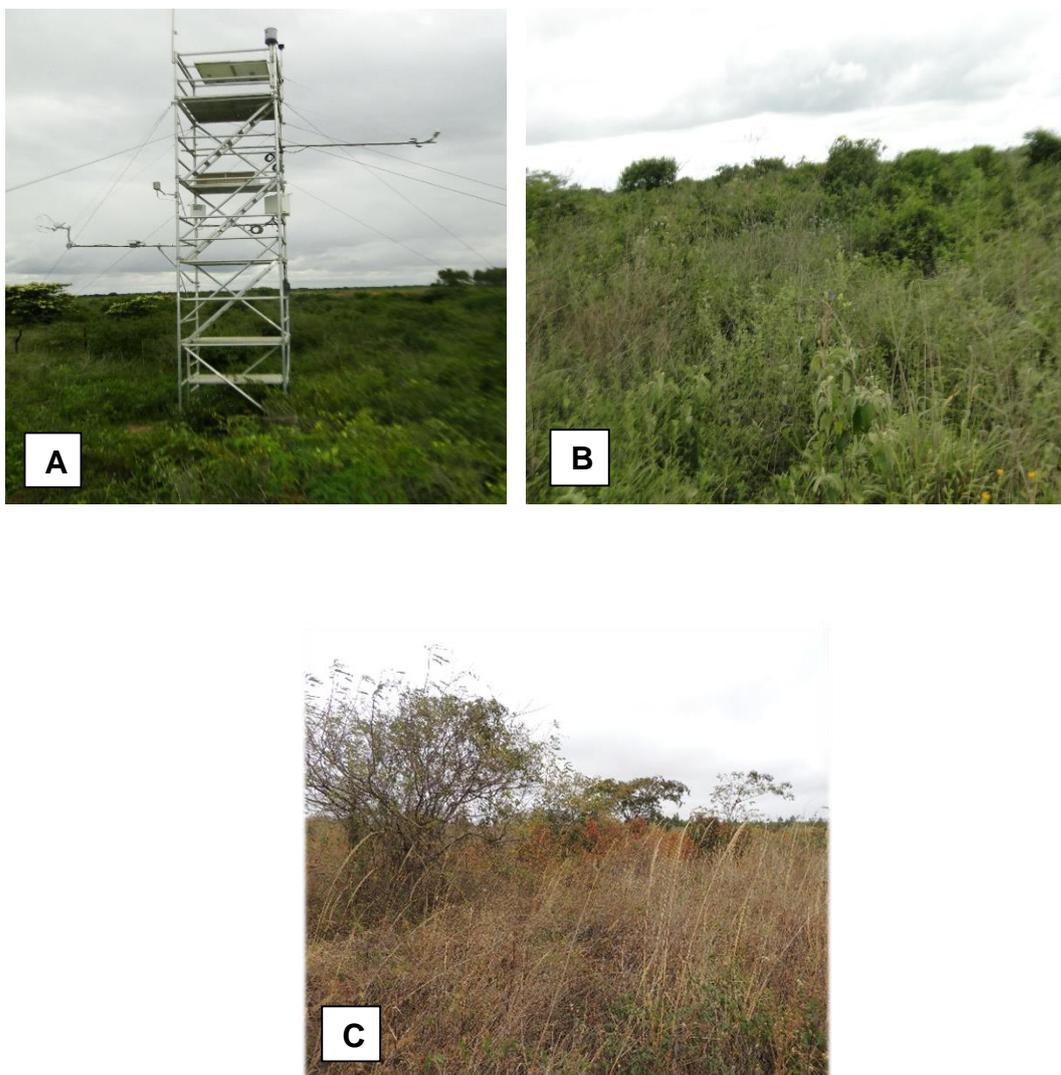
A Torre 2 (figura 5) localiza-se em uma área de Caatinga em estado de regeneração localizada no município de Araripina (07°25'12 S; 40°25'12 W, 788 m), na região da Chapada do Araripe no estado de Pernambuco.

O relevo da área estudada também se apresenta com pouca movimentação, possui uma área e torno de 4 ha de caatinga em regeneração. O solo é classificado como Latossolo Amarelo, e a temperatura média de 24°C, com uma precipitação anual em torno de 752 mm (PIRES et al., 2014).

A região do Araripe apresenta modificações no seu ambiente ao longo do tempo, que se fez por meio de retirada da cobertura vegetal de áreas nativas por meio do desmatamento para a extração de lenha com o fim de uso pelas indústrias gesseiras como fonte de energia (SÁ et al., 2008).

O histórico de antropização dessa área se fez por meio de cultivos no passado, pois houve práticas de roços e queimadas para o plantio de feijão em 1977, seguindo culturas de milho e sorgo até 1997, e permanecendo um tempo sem uso até 2009, com pastejo animal em períodos chuvosos, e hoje a vegetação se regenera com espécies de porte arbustivo-herbáceo, com uma altura média de em torno de 1,2 metros (PIRES, 2015).

**Figura 7:** Imagens da área de Caatinga em regeneração. A) Torre 2, B) dossel da caatinga no período chuvoso e C) dossel da caatinga no período seco.



## **4.2. Aquisição de imagens e dados**

### **4.2.1. Imagens**

Foram utilizadas cenas do sensor *Operational Land Imager* (OLI) instalado no Satélite Landsat 8. Cada imagem do sensor OLI possui uma resolução espacial de 30 metros, resolução temporal de 16 dias, uma área imageada de 185 km e uma resolução radiométrica de 12 bits (BRASIL, 2016).

As imagens foram adquiridas gratuitamente pelo Serviço Geológico Norte Americano (USGS) representando os períodos chuvoso e seco da região entre os anos de 2013, 2014 e 2015. O critério para a seleção das cenas foi a eliminação das imagens com cobertura de nuvens nos pixels estudados, e foram selecionadas um total de 22 imagens, com datas que fazem relação a disponibilidade de dados de campo existentes para os dias de passagem do sensor OLI no ponto das áreas de estudo. As datas e os horários (GMT) de imageamento das cenas estão apresentados na tabela 1.

As cenas utilizadas no presente estudo fazem uma relação ao ponto de referência de localização das coordenadas geográficas das duas torres micrometeorológicas que estão localizadas uma em um ambiente de Caatinga preservada (Torre 1) e outra em uma Caatinga em regeneração (Torre 2), ambas realizando estudos junto ao Projeto Caatinga-Flux, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido (EMBRAPA/CPATSA).

**Tabela 1:** Datas e horários de passagem do sensor OLI nas áreas de estudo.

Área	Data de registro da cena	Ponto/ Órbita	Horário (GMT)
Caatinga preservada	30/05/2013		12:50:03
	01/07/2013		12:49:58
	17/07/2013		12:49:58
	03/09/2013		12:50:02
	05/10/2013		12:49:53
	21/10/2013		12:49:48
	09/01/2014	217/66	12:49:16
	25/01/2014		12:49:07
	30/03/2014		12:48:14
	04/07/2014		12:47:48
	28/01/2015		12:47:57
	13/02/2015		12:47:49
	07/07/2015		12:47:29
Caatinga em regeneração	19/09/2013		12:49:33
	09/01/2014		12:48:53
	02/06/2014		12:47:13
	04/07/2014		12:47:25
	20/07/2014	217/65	12:47:29
	31/01/2016		12:47:39
	16/02/2016		12:47:31
	06/05/2016		12:47:12
22/05/2016		12:47:13	

#### 4.2.2. Dados de campo

Para as datas de imageamento, foram obtidos dados mensurados por meio de torres micrometeorológicas de fluxo de CO<sub>2</sub>, direção do vento e percurso de fluxo em ambas áreas de estudo, todos na frequência de 30 minutos.

As medidas de fluxos de CO<sub>2</sub> em ambas as torres foram determinadas por meio do método de Covariância de Vórtices Turbulentos (*Eddy Covariance*), que de acordo com Aguiar e colaboradores (2006), é um sistema que emprega sensores

de resposta rápida, medindo três componentes da velocidade do vento: velocidade horizontal do vento a leste, velocidade horizontal do vento a norte, e velocidade vertical do vento. O sistema fornece médias a cada 30 minutos.

As medições dos fluxos de CO<sub>2</sub> na área de Caatinga preservada foram realizadas por um analisador de gás infravermelho de caminho aberto denominado IRGA, modelo LI7500 (Li-Cor Inc., Lincoln, NE, EUA), instalado a uma altura de 8 metros da superfície, operando em alta frequência e atribuindo médias a cada 30 minutos em  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Para a área de Caatinga em regeneração, o modelo do equipamento é o LI7550 (Li-Cor Inc., Lincoln, NE, EUA), que fica instalado a uma altura de 5 metros da superfície, e opera da mesma forma que o outro modelo de equipamento.

Para uma análise espacial da dinâmica do CO<sub>2</sub>, foi determinada a área de influência em relação ao ponto de medição, por meio do *footprint* das torres, com o objetivo de determinar as áreas de influência em relação as datas selecionadas. De acordo com Moura e colaboradores (2007), esse procedimento está relacionado a determinação de um campo de visão do que é medido pelo sensor que está instalado em uma torre. Para Pedroza da Silva e Baptista (2015), ele determina as áreas de maior influência dos fluxos de constituintes atmosféricos de um determinado local. A determinação desse modelo é um importante subsídio para a interpretação dos resultados medidos, principalmente ao se tratar de uma paisagem com diferentes fontes de fluxo na superfície (ZHAO et al., 2014).

O *footprint* das áreas em torno das torres foi determinado com base na predominância da direção dos ventos durante o tempo de aquisição das imagens, variável na qual foi registrada por meio de um anemômetro sônico tridimensional, modelo CSAT-3 (*Campbell Scientific Inc.*, Logan, UT, EUA), realizando medições atribuindo médias a cada 30 minutos. Porém, os polígonos foram ajustados para evitar a coleta de dados em pixels que apresentassem nuvens em qualquer uma das cenas utilizadas e descritas na Tabela 1.

Portanto, de acordo com Moura e colaboradores (2007), dentro de uma grande área, enquanto houver homogeneidade, há uma tendência dos fluxos que

mostrará que em todas as partes dessa área são iguais, independentemente da localização do sensor de medição.

### **4.3. Pré-Processamento digital das imagens**

#### **4.3.1. Conversão de ND para Radiância**

Foi realizada a conversão dos números digitais para radiância utilizando o software ENVI 5.2 por meio do módulo *Calibration Radiometric*.

#### **4.3.2. Correção Atmosférica**

Foi realizada a correção dos efeitos atmosféricos utilizando o modelo de transferência radiativa (*MODTRAN*), que se baseia nos parâmetros físicos da atmosfera (PEDROZA DA SILVA & BAPTISTA, 2015).

Para a aplicação do método foi utilizado o módulo *FLAASH* no software ENVI 5.2, e em sua configuração, os parâmetros utilizados foram de atmosfera tropical, aerossol rural, altitude do terreno de acordo com o ponto marcado em cada local de amostragem, e a quantidade de aerossóis e a visibilidade média foram geradas do meio do método K-T.

### **4.4. Processamento digital das imagens**

#### **4.4.1. Determinação dos Índices de Vegetação.**

##### **NDVI**

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), propõe o uso das bandas do vermelho e do infravermelho próximo em um processo de diferença normalizada pela soma, que representa a relação de uma banda com a outra (PEDROZA DA SILVA, 2014), apresentando um intervalo entre -1 a +1. Segundo Baptista (2003), se trata da razão da diferença normalizada da refletância entre a feição de absorção do vermelho (0,66  $\mu\text{m}$ ) e o aumento de albedo que ocorre nos espectros de vegetação após o início do infravermelho próximo (0,80  $\mu\text{m}$ ) de acordo com a (Equação 1).

Como ferramenta de monitoramento da vegetação, esse índice é utilizado na construção de perfis temporais das atividades da vegetação, o que permite comparações interanuais (PONZONI & SHIMABUKURO, 2007).

$$NDVI = \frac{(R_5 - R_4)}{(R_5 + R_4)} \quad (\text{Equação 1})$$

R é o valor de reflectância em cada comprimento de onda, em  $\mu\text{m}$ , da banda.

Foram utilizadas as bandas 4 e 5 no sensor OLI.

### **PRI**

O Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI) (Equação 2) (GAMON et al., 1997), expressa a razão da diferença existente entre a feição de absorção no azul e o pico de reflectância do verde, podendo ser correlacionado com o uso eficiente da luz na fotossíntese (BAPTISTA, 2003). Esse índice apresenta um intervalo de -1 a +1.

$$PRI = \frac{(R_2 - R_3)}{(R_2 + R_3)} \quad (\text{Equação 2})$$

R é o valor de reflectância em cada comprimento de onda, em  $\mu\text{m}$ , da banda.

Foram utilizadas as bandas 2 e 3 no sensor OLI.

O PRI precisa de um reescalonamento evitando dados negativos. Portanto, foi determinado o Índice de Reflectância Fotoquímica reescalonado para valores positivos (sPRI) (Equação 3): Esse índice apresenta um intervalo de 0 a 1.

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

### **CO<sub>2</sub>flux**

A determinação do CO<sub>2</sub>flux foi realizada por meio da multiplicação no NDVI e sPRI (RAHMAN et al., 2000), em que é proposto a integração desses dois índices para determinar a eficiência do processo de sequestro de carbono em uma escala de -1 a +1.

$$CO_2\text{flux} = NDVI * sPRI \quad (\text{Equação 4})$$

Todos os índices gerados foram calculados pelo módulo *Band Math* do ENVI 5.2.

#### **4.5. Análise Estatística**

Os procedimentos estatísticos foram utilizados para a comparação dos resultados a partir dos índices gerados com os dados mensurados em campo para verificar o nível de correlação entre as variáveis estudadas.

Primeiramente foi verificado a normalidade dos dados por meio do teste de Shapiro-Wilk (teste W), que é obtido por meio da divisão do quadrado da combinação linear apropriada dos valores ordenados da amostra por sua variância simétrica estimada.

A partir dos ajustes de função que representam o comportamento das variáveis independentes (as obtidas pelas torres) e dependentes (índices espectrais) e do teste W, parte das variáveis não apresentaram distribuição normal, portanto, foi adotado um teste de hipótese não paramétrico, que são testes que comparam distribuição dos dados quanto a localização, quanto a variabilidade ou para a avaliação da correlação entre as variáveis (CALLEGARI-JACQUES, 2003). A similaridade estatística entre as variáveis foi estudada por meio do teste Wilcoxon-Mann-Whitney (teste U).

Esses procedimentos estatísticos do teste W e teste U foram realizados por meio do software BioEstat 5.0.

### **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

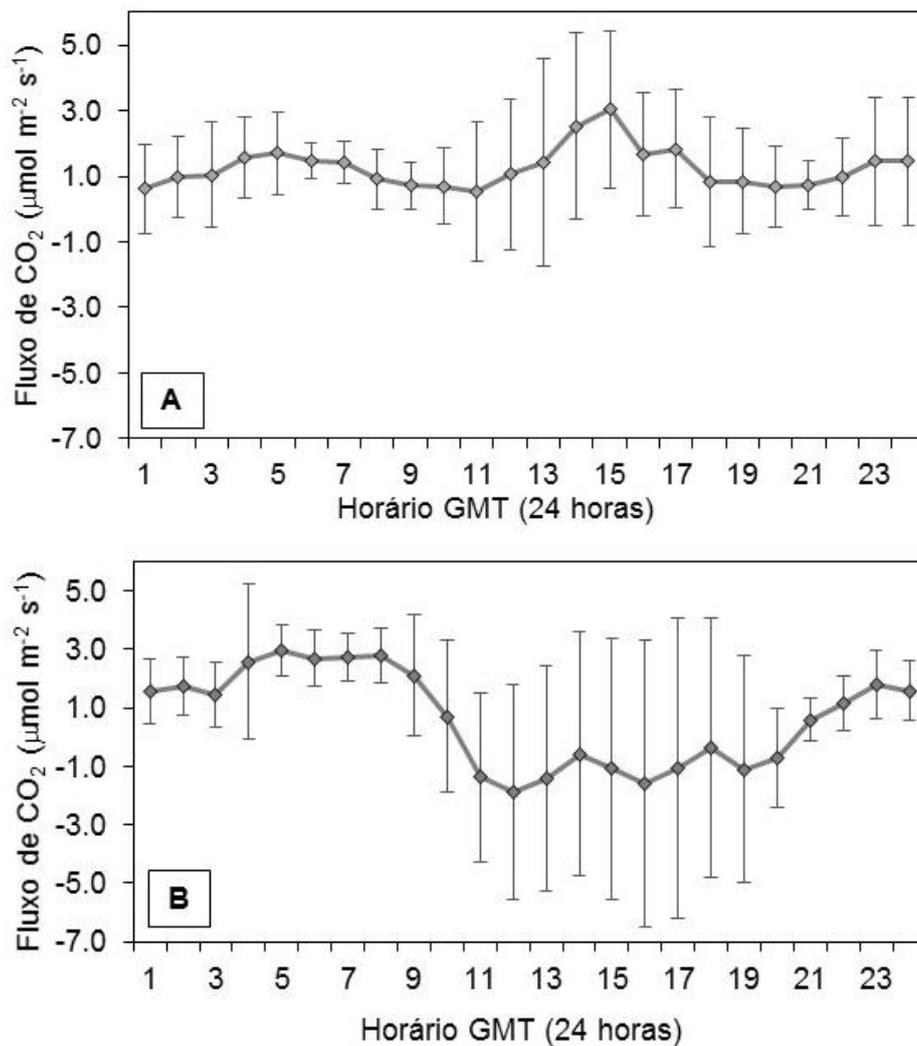
#### **5.1. Medição e análises dos fluxos de CO<sub>2</sub>**

Um dos métodos existentes para medição direta de fluxos de CO<sub>2</sub> é o de Covariância de Vórtices Turbulentos (*Eddy Covariance*), que para Aguiar e colaboradores (2006), é uma técnica micrometeorológica que faz a medição de trocas de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e calor sensível no ecossistema. Para Pedroza da Silva e Baptista (2015), o método faz a medição do fluxo vertical de CO<sub>2</sub>, fazendo o cálculo de covariância entre as flutuações da velocidade vertical do vento e concentrações de CO<sub>2</sub>.

A Figura 8 mostra o comportamento do fluxo de CO<sub>2</sub> em seu ciclo diário para as duas áreas em estudo na Caatinga. Na região com predominância de vegetação preservada, os dias estão distribuídos ao longo dos anos 2013, 2014 e 2015, e na Caatinga em regeneração, as datas representam os anos de 2013, 2014 e

2016. Essas datas estão de acordo com os dias de passagem do satélite Landsat-8, portanto, ambas as áreas estão com dias que fazem referência a passagem do sensor OLI no ponto de estudo e a disponibilidade de dados existentes para esses dias.

**Figura 8:** Médias diárias do fluxo de CO<sub>2</sub> em áreas mensuradas por meio do sensor instalado na torre micrometeorológica nas áreas de Caatinga: A) Caatinga preservada, e B) Caatinga em regeneração.



Os valores negativos apresentados na figura 8 indicam a absorção de CO<sub>2</sub> (fotossíntese pela vegetação), e os valores positivos indicam a perda de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (respiração). As barras verticais representam o desvio padrão dos fluxos.

Os fluxos de CO<sub>2</sub> mensurados nas áreas mostram oscilações ao longo do dia, o que já é esperado para ambientes semiáridos, pois, na dinâmica dos fluxos, as condições meteorológicas locais interferem nas trocas de CO<sub>2</sub> entre a vegetação e a atmosfera.

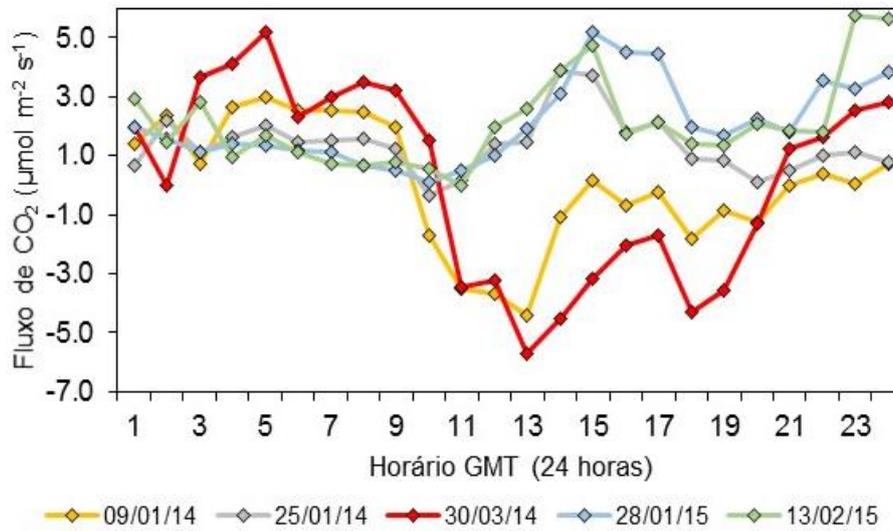
Com relação as variações na dinâmica da caatinga preservada, as médias dos fluxos de CO<sub>2</sub> no período diurno (horário local) variaram entre 0,5 e 3,0  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , ao chegar a noite, oscilaram entre 0,6 e 1,7  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Na Caatinga em regeneração, as médias variam no período diurno entre -1,9 e 2,1  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e 1,2 a 3,0  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  no período noturno.

Outros resultados para a caatinga preservada foram encontrados por Oliveira e colaboradores (2006), que estudaram essas áreas, medindo taxas de fluxo médio de CO<sub>2</sub> em estação seca que chegou a atingir -2,3  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , com registros de taxas com até -5,0  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  durante o período diurno, e durante a noite, as taxas variando entre 0,2 e 1,2  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

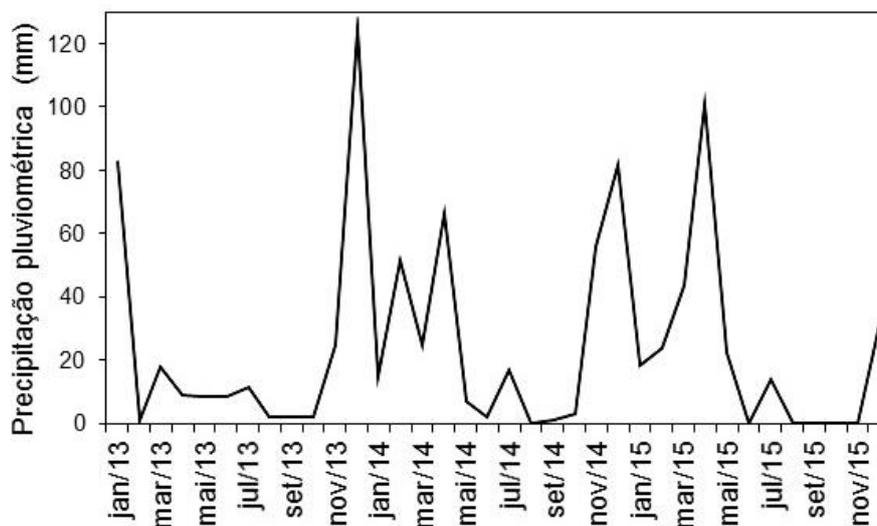
Os fluxos de CO<sub>2</sub> diários do presente estudo na caatinga preservada apresentaram em maioria, valores positivos durante o dia, o que indica que a atividade fotossintética estava minimizada, concordando com Oliveira e colaboradores (2006), que também encontraram no período mais seco, valores positivos durante o período diurno, e justificou que a fotossíntese foi minimizada devido à queda das folhas das árvores e arbustos, com consequente diminuição da atividade metabólica do ecossistema nesse período.

É observado também na figura 8a, que a caatinga preservada, embora tenha variabilidade na dinâmica do CO<sub>2</sub> ao longo do dia, apresenta também um comportamento dos fluxos de CO<sub>2</sub> no período diurno que são típicos de regiões semiáridas com predominância de períodos secos em maior parte do ano, onde a atividade fotossintética da vegetação é reduzida, o que vem a implicar no aumento das emissões (respiração) de CO<sub>2</sub> em maior parte do dia, como apresentado na figura 9. Isso pode ser justificado pelos poucos registros de chuva ocorrentes nessa região, que registrou nesse período estudado uma precipitação pluviométrica abaixo da média, como observado na figura 10.

**Figura 9:** Fluxo diário de CO<sub>2</sub> na área de caatinga preservada em período chuvoso. Estação Micrometeorológica da Caatinga, Embrapa Semiárido.



**Figura 10:** Total mensal de Precipitação durante o período de 2013 a 2015 na área de Caatinga preservada. Estação Micrometeorológica da Caatinga, Embrapa Semiárido.



De acordo com a figura 10, durante os três anos de análise na área de caatinga preservada, foram registrados valores de precipitação inferiores a 20 mm em maioria dos meses, com o período chuvoso compreendendo meses de novembro a abril, e com intensidades maiores para os meses de dezembro de 2013 registrando 125 mm e abril de 2015 registrando 101 mm.

Segundo Oliveira e colaboradores (2006), baseado em uma série de 30 anos de medição na região, constatou-se uma ocorrência de chuvas concentradas entre

os meses de novembro e abril, porém, os autores ressaltam a irregularidade dessas chuvas em seu estudo, apresentando uma série registrada de julho de 2004 a julho de 2005, na qual os eventos extremos de chuva ocorreram entre janeiro e abril, o que difere do presente estudo, no qual, de acordo com os dados registrados foi considerado o período chuvoso compreendendo os meses de novembro a abril, o que veio a apresentar 88% da precipitação registrada durante o período estudado. Portanto, é constatado a existência de uma estação seca intensa e duradoura.

Com relação aos fluxos da caatinga em regeneração, as médias dos fluxos de CO<sub>2</sub> variaram no período diurno entre -1,9 e 2,1  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e 1,2 a 3,0  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  no período noturno, e assim como Rahman e colaboradores (2001), os dados diários de fluxo de CO<sub>2</sub> mostraram um padrão negativo em grande parte do período diurno, mostrando que há atividade fotossintética na vegetação por meio da presença da luz, mesmo com dados de períodos secos e chuvosos.

O comportamento diário dos fluxos de CO<sub>2</sub> com valores negativos em maior parte do dia se assemelham ao padrão apresentado por Aguiar e colaboradores (2006), em um estudo realizado em uma floresta no estado de Rondônia, onde o padrão dos fluxos apresentaram comportamento semelhante, no entanto, a intensidade foi maior em relação a caatinga em regeneração, em função da densidade da vegetação, com alta atividade fotossintética em regiões de floresta mais densa, chegando a encontrar no período noturno médias de fluxos variando entre 5,0 e 9,0  $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .

Portanto, na Caatinga, nas primeiras horas do dia a vegetação começa a absorver CO<sub>2</sub> de forma mais intensa, invertendo o processo à noite, quando passa a ser um emissor de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

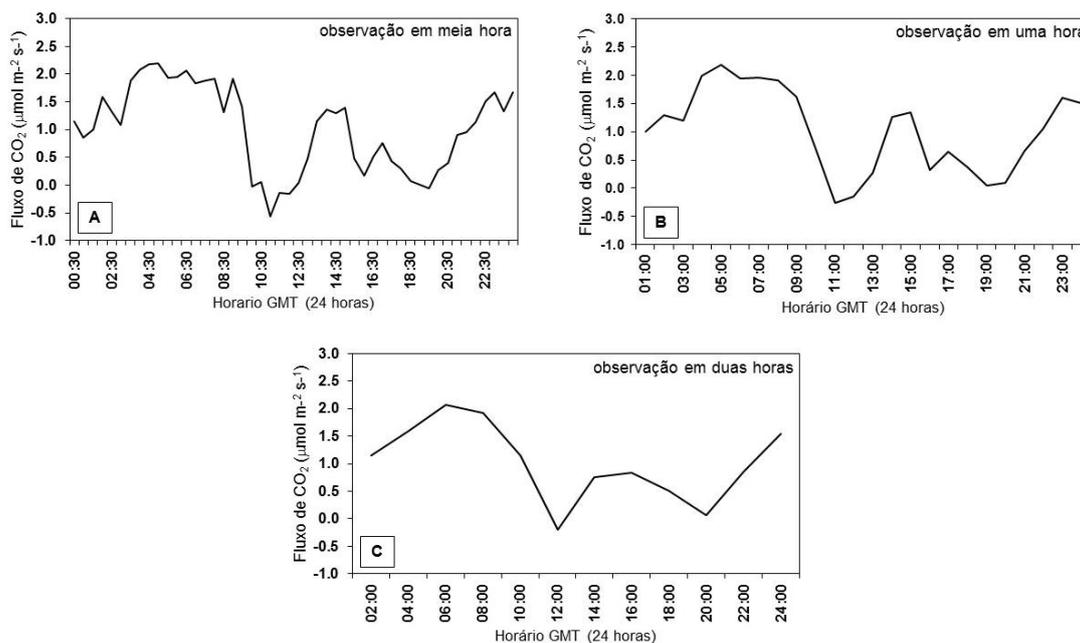
Para as datas selecionadas no presente estudo nas áreas de caatinga, a passagem do sensor OLI aconteceu entre os horários 12:47:12 a 12:50:03 (GMT). Portanto, para efeitos de comparação com o índice CO<sub>2</sub>flux, os valores de fluxo de CO<sub>2</sub> foram padronizados para observações em meia, uma e duas horas, visto que dentro desses intervalos está a passagem do sensor OLI nos pontos amostrais. As padronizações foram relacionadas aos índices espectrais

de vegetação, visando uma análise de dados o mais próximo possível do momento em que há a captura da imagem por meio do sensor orbital.

A figura 11 apresenta as flutuações dos dados a cada meia, uma e duas horas, e observa-se que há grandes flutuações quando observado as médias a curto prazo, a exemplo, meia hora, pois, segundo Rahman e colaboradores (2000; 2001), essas flutuações com intervalos mais curtos podem mascarar tendências diurnas nos dados, o que difere de uma padronização de duas horas, onde há um padrão mais suavizado, o suficiente para mostrar alguma tendência diurna.

De acordo com os resultados, as variações no comportamento dos dados quando padronizados a cada meia hora começam a perder nuances quando atribuído médias a cada uma e duas horas, como apresentando na figura 11.

**Figura 11:** Flutuação dos dados de fluxo de CO<sub>2</sub> com observações em: A) meia hora, B) uma hora e C) duas horas.



Um padrão semelhante de flutuações nos fluxos de CO<sub>2</sub> está no estudo de Rahman e colaboradores (2000) em uma floresta boreal, na qual apresentou variação na flutuação dos fluxos ao longo do dia quando observados a cada meia hora, e curvas muito suavizadas quando observados a cada duas horas.

Outro padrão com grande variação nos dados foi determinado por Pedroza da Silva e Baptista (2015) em um estudo na Floresta Amazônica, no qual a

intensidade das flutuações de CO<sub>2</sub> de uma hora foi grandemente suavizada ao determinar a observação em duas horas, o que resultou em um melhor ajuste nos dados, apresentando um  $R^2 = 0,86$ , e a partir dele, obtiveram boas correlações com dados de fluxo.

## **5.2. Análise dos fluxos de CO<sub>2</sub> por meio do índice CO<sub>2</sub>flux**

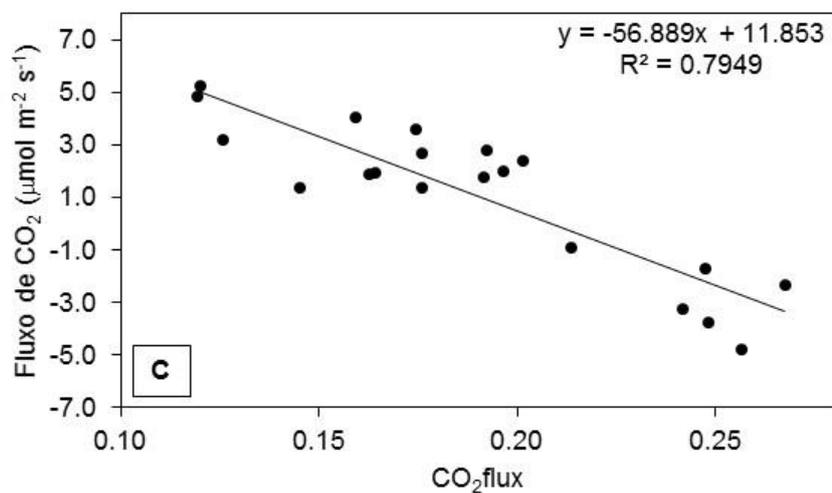
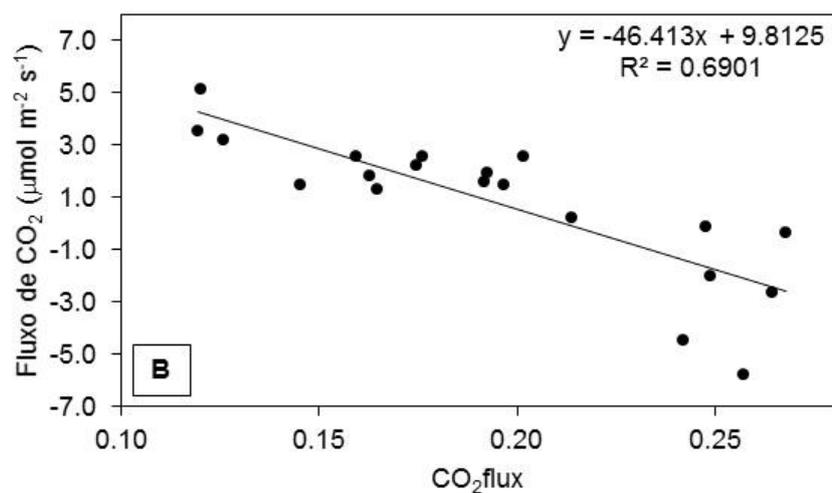
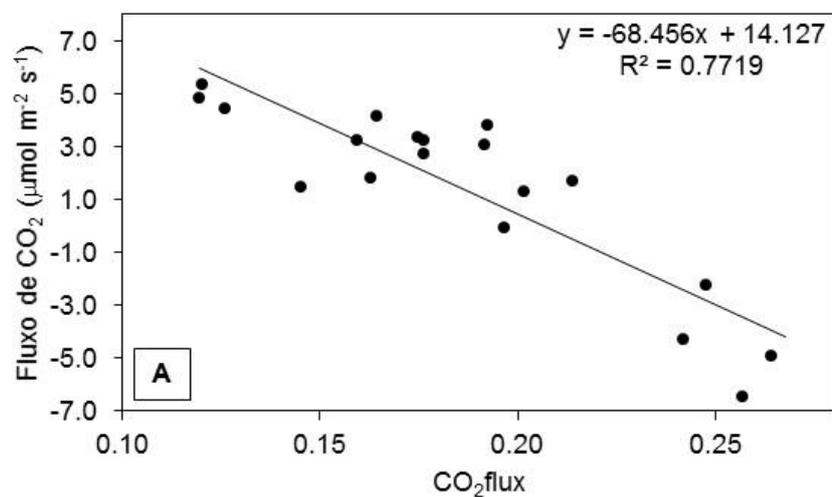
Os resultados apresentados fazem referência as relações estatísticas entre as variáveis analisadas, na qual, uma faz referência ao dado gerado por meio do índice CO<sub>2</sub>flux extraído das imagens OLI, e outra mensurada por meio do sensor instalado na torre micrometeorológica determinado pelo método de Covariância de Vórtices Turbulentos.

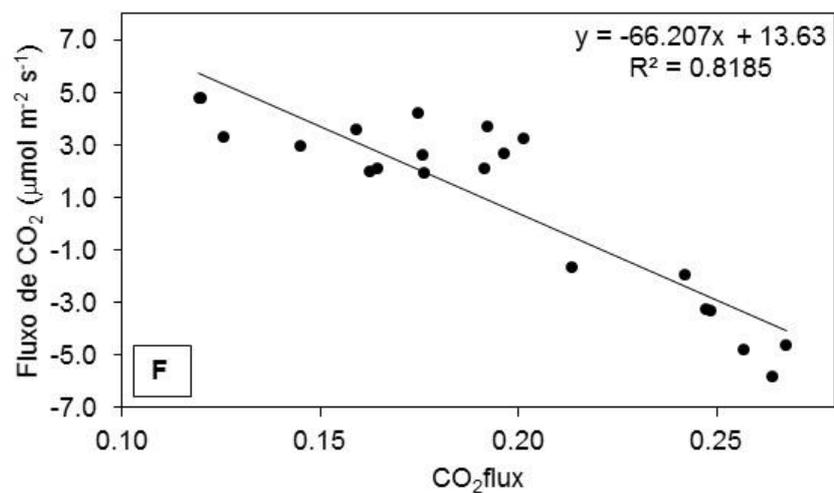
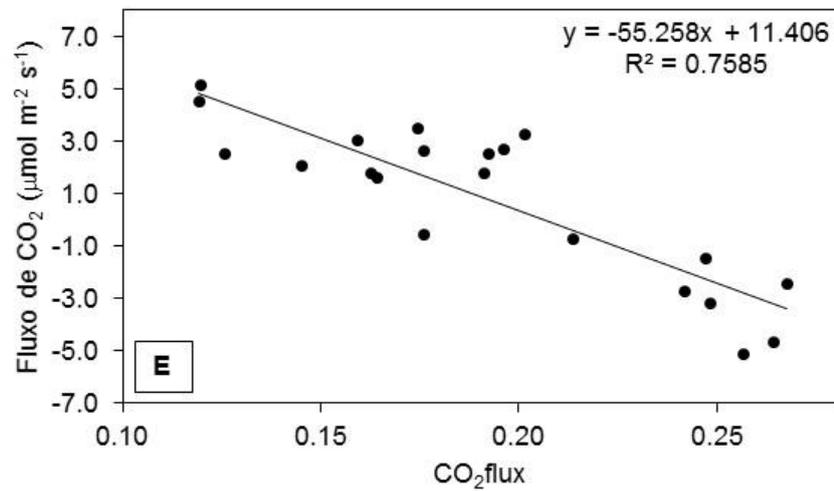
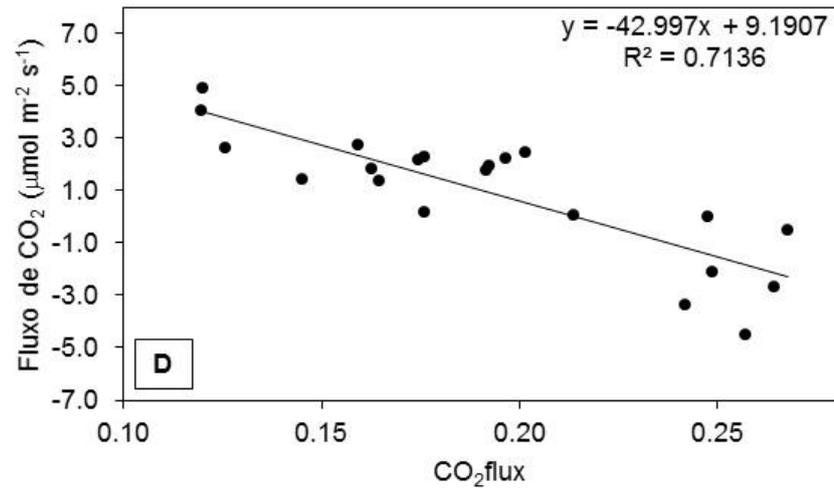
Os fluxos de CO<sub>2</sub> foram analisados por meio do CO<sub>2</sub>flux, também com fator de tendência temporal de flutuação nos dados de CO<sub>2</sub> entre meia, uma e duas horas. Nessa primeira análise, foi utilizado a leitura do pixel correspondente à localização da torre micrometeorológica para extração dos valores espectrais, que fazem as medições de fluxo de CO<sub>2</sub> por meio do método de *Eddy Covariance*, com o Índice de Sequestro Florestal de Carbono.

Primeiramente, foram realizados os ajustes (Figura 12) das variáveis analisadas com o objetivo de verificar qual intervalo é o mais representativo para a determinação dos modelos, considerando como variável independente (X) os valores do índice espectral obtido no processamento das imagens (CO<sub>2</sub>flux) e o dependente (Y) para o fluxo de CO<sub>2</sub> medido por meio do sensor instalado nas torres.

As duas variáveis foram analisadas por meio de um coeficiente de determinação ajustando o modelo CO<sub>2</sub>flux a uma função linear. Os ajustes com os dados estão apresentados na figura 12, em seis grupos de análise.

**Figura 12.** Ajustes do índice CO<sub>2</sub>flux com dados de fluxo de CO<sub>2</sub> com observações em: A) meia hora (13:00), B) uma hora (12:30 e 13:00), C) uma hora (13:00 e 13:30), D) duas horas (12:00 a 13:30), E) duas horas (12:30 a 14:00) e F) duas horas (13:00 a 14:30).





Os coeficientes de determinação entre as variáveis mostraram um melhor ajuste com os dados de fluxo associado ao modelo CO<sub>2</sub>flux com observação em duas horas ( $R^2 = 0,82$ ), concordando com Pedroza da Silva e Baptista (2015), que

analisando regiões na Floresta Amazônica com dados do sensor hiperespectral Hyperion obtiveram um coeficiente semelhante ( $R^2 = 0,87$ ) com ajustes realizados também com observações a cada duas horas.

Outros ajustes do presente estudo, com observação em meia hora ( $R^2 = 0,79$ ) e uma hora ( $R^2 = 0,81$ ), embora, sejam pouco menores em relação a padronização de duas horas, são coeficientes que se mostram a representatividade da análise dos fluxos de  $\text{CO}_2$  junto ao pixel de localização da torre.

Outro resultado semelhante foi o de Rahman e colaboradores (2001) que comparou o índice  $\text{CO}_2$ flux com os dados brutos de  $\text{CO}_2$  de torres em uma região de floresta boreal do Canadá, obtendo um coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,82$ ) que mostrou uma elevada relação para dados do sensor AVIRIS.

Portanto, por meio do coeficiente apresentado, pode-se afirmar que a modelagem de dos fluxos de  $\text{CO}_2$  apresenta o melhor ajuste com dados de fluxo com observações realizadas a cada duas horas.

Foi realizado o teste Shapiro-Wilk (teste W) (Tabela 2) para a verificar a normalidade dos dados, pois, por meio desse teste, determina-se se as amostras de uma variável provêm de uma distribuição normal ou não, fator que é determinante na escolha da análise ou teste de hipótese a ser utilizado para verificar a similaridade entre os dados.

**Tabela 2:** Teste de Normalidade (teste W)

Teste W	$\text{CO}_2$ flux OLI	Fluxo de $\text{CO}_2$ ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )		
		meia hora	uma hora	duas horas
N	22	22	22	22
<i>p</i> -valor	0,2683	0,0099	0,1023	0,0099

De acordo com o teste W, o *p*-valor calculado ao nível de significância de 5% apresentou apenas duas das variáveis possuindo normalidade ( $\text{CO}_2$ flux OLI e fluxo de  $\text{CO}_2$  para uma hora) nos dados, e outras duas que não possuem (fluxo de  $\text{CO}_2$  de meia e duas horas).

Como o número de amostras é relativamente pequeno, com dimensão menor que 30, e parte dos dados não aderem a uma distribuição normal, foi realizado uma análise estatística baseada na teoria não-paramétrica, que são estatísticas

com técnicas de inferência que podem ser utilizadas em distribuições de resultados que não obedecem aos parâmetros de uma curva normal (VIVALDI et al., 2013).

Foi adotado o teste Wilcoxon-Mann-Whitney ou teste U (Tabela 3), que de acordo com Vivaldi e colaboradores (2013), é um teste no qual os valores de U calculados fazem a avaliação do grau de entrelaçamento dos dados de dois grupos após a ordenação, o que determina que a maior separação dos dados em conjunto, mostram que as amostras são similares ou diferentes, aceitando-se ou rejeitando-se a hipótese de similaridade das medianas.

**Tabela 3.** Teste de Similaridade (teste U).

Teste U	Comparação entre CO <sub>2</sub> flux OLI e Fluxo de CO <sub>2</sub> ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )		
	meia hora	uma hora	duas horas
<i>p</i> -valor	0,1213	0,1213	0,1213

De acordo com a tabela 3, existe similaridade estatística entre as variáveis, pois, todos os valores *p* com suas observações em meia, uma e duas horas são maiores que ao nível de significância de  $\alpha=0,05$ , o que conclui que não há diferença entre os dados espectrais com leitura de 1 pixel nas imagens do sensor OLI e os dados medidos pelo sensor instalado na torre micrometeorológica para as áreas da Caatinga.

Por meio da análise estatística, compreende-se que os modelos de CO<sub>2</sub>flux gerados para as áreas da Caatinga acompanham bem a troca líquida de CO<sub>2</sub> medida pela técnica *Eddy Covariance*.

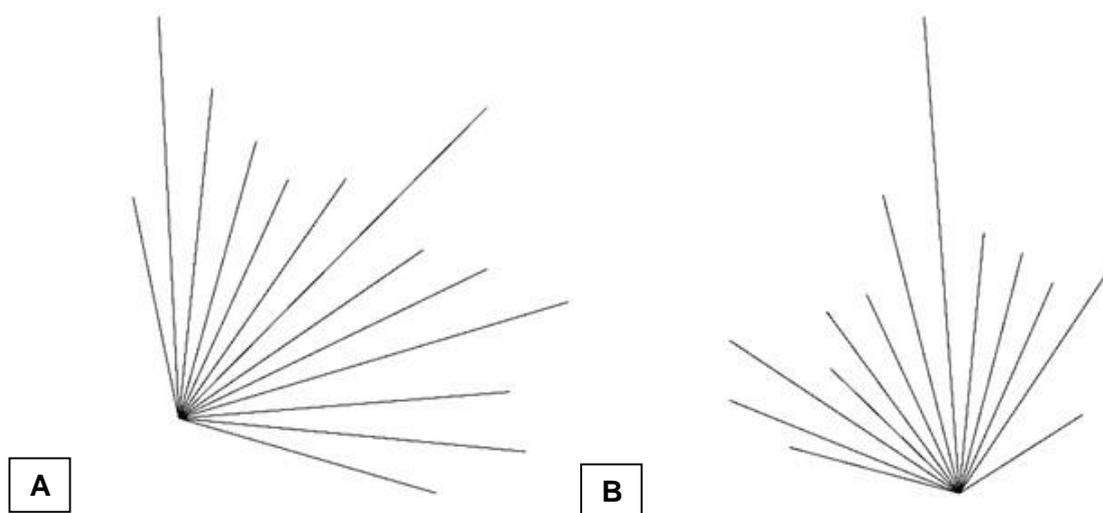
De acordo com a análise da modelagem pontual, ou seja, o pixel que representa a localização da torre que mede o fluxo de CO<sub>2</sub> nas áreas de Caatinga, tanto preservada como em estado de regeneração, pode-se obter uma espacialização do fluxo de CO<sub>2</sub> por meio do índice CO<sub>2</sub>flux, sendo que as variáveis analisadas possuem similaridade e são estatisticamente significativas, ou seja, mais de 80% do CO<sub>2</sub>flux explica o fluxo de CO<sub>2</sub> tanto para meia, como para uma, como para duas horas.

### 5.3. Análise espacial (*footprint*) dos fluxos de CO<sub>2</sub> por meio do índice CO<sub>2</sub>flux

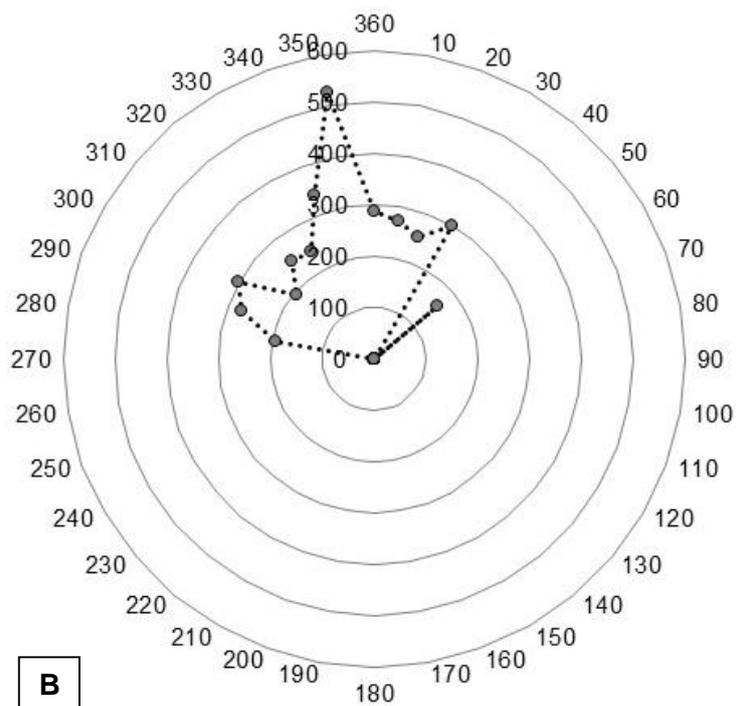
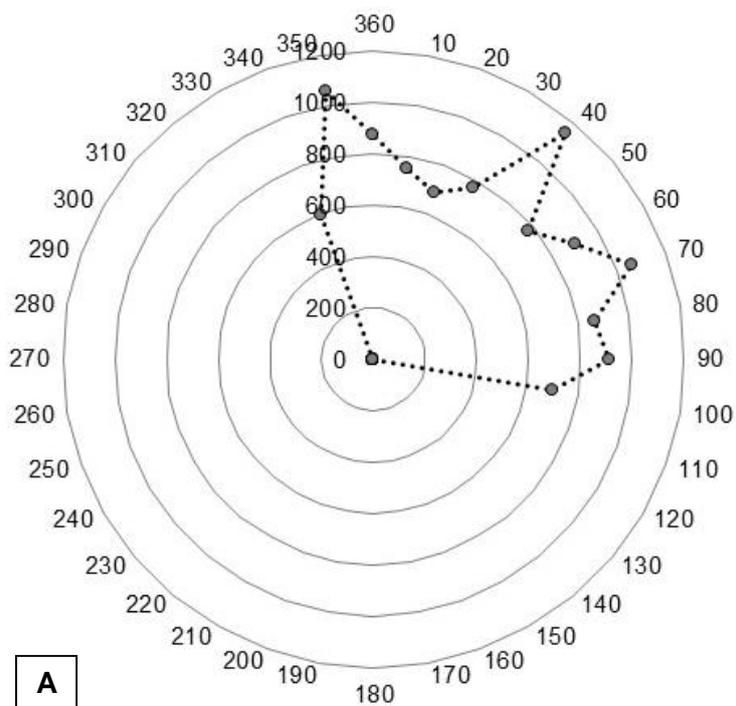
Com o objetivo de analisar a dinâmica do CO<sub>2</sub> por meio do índice CO<sub>2</sub>flux, avaliando o seu potencial para a determinação de fluxos de CO<sub>2</sub> em áreas de influência (*footprint*) em relação as torres micrometeorológicas, as variáveis foram analisadas por meio da predominância da direção dos ventos em relação aos pontos de medição, como apresentado na figura 14.

Os pontos gerados que representam o *footprint* das torres foram extraídos por meio da média da distribuição de frequência da direção dos ventos e do percurso dos fluxos. Em seguida, os pontos foram plotados em um Sistema de Informação Geográfica (SIG) (figura 13), que utilizou as coordenadas geográficas como referência e uma imagem OLI para a geração de polígonos (figura 15), nos quais representam a área de influência em relação aos pontos de medição. A área de influência em relação as torres estão apresentadas na figura 14.

**Figura 13:** Direção dos ventos e percurso dos fluxos de CO<sub>2</sub>. A) Torre 1 e B) Torre 2.



**Figura 14:** Média da distribuição de frequência da direção dos ventos e percurso dos fluxos em relação as torres micrometeorológicas das áreas de estudo: A) Caatinga preservada e B) Caatinga em regeneração.

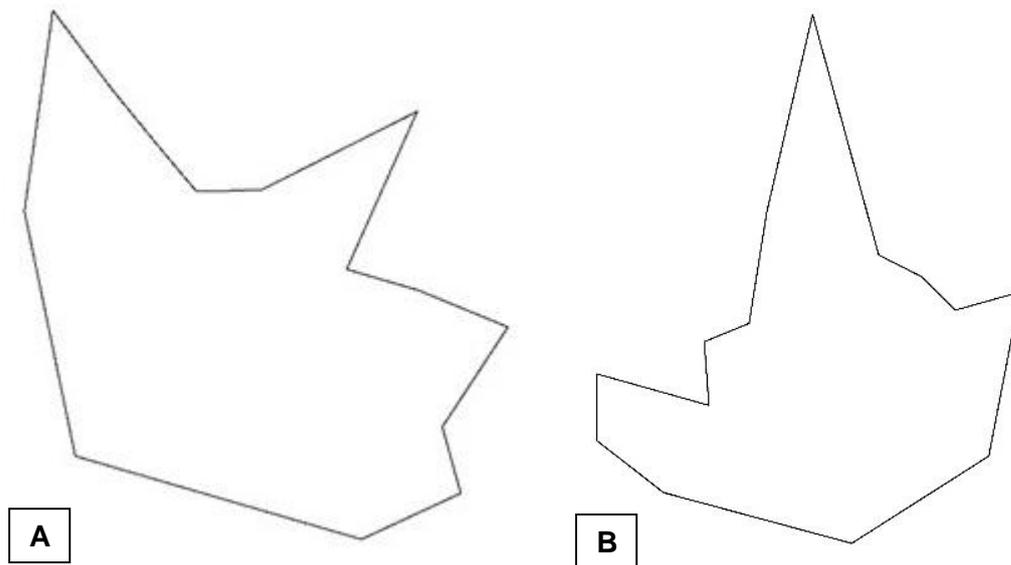


Os pontos na figura 14 representam uma contribuição acumulada de 80% dos fluxos mensurados, e mostra uma área de influência próxima a torre chegando a atingir na Caatinga preservada pouco mais de 1 km, e chegando a atingir pouco mais de 500 m em relação a área com vegetação em regeneração.

Em condições estáveis, os modelos de *footprint* apresentados por Moura e colaboradores (2007), em uma Reserva Biológica de Cuieiras no Amazonas, apresentou uma distância máxima que chegou a atingir 2,5 km de área de influência em relação a uma das torres estudadas, concordando com Pedroza da Silva e Baptista (2015), que estudando a mesma área, determinaram 2,3 km de distância, encontrando também em uma área de pastagem no sudoeste de Rondônia, distâncias máximas de 650 m, o que se assemelha as condições de Caatinga e estado de regeneração apresentada na figura 14.

Por meio do Software ENVI 5.2, utilizando o *Open Vector File*, o *footprint* foi importado, em seguida, por meio do módulo *Region Of Interest*, foi delimitada sua área de influência, e determinado suas médias.

**Figura 15:** Área de *footprint* das torres micrometeorológicas. A) Torre 1 e B) Torre 2.



Com relação as áreas de influência das torres micrometeorológicas, a região com predominância de Caatinga preservada compreendeu uma área de 77 ha, enquanto a área de Caatinga em regeneração estava representada por uma área de 9 ha. Salienta-se, porém, as áreas do *footprint* foram ajustadas para evitar a

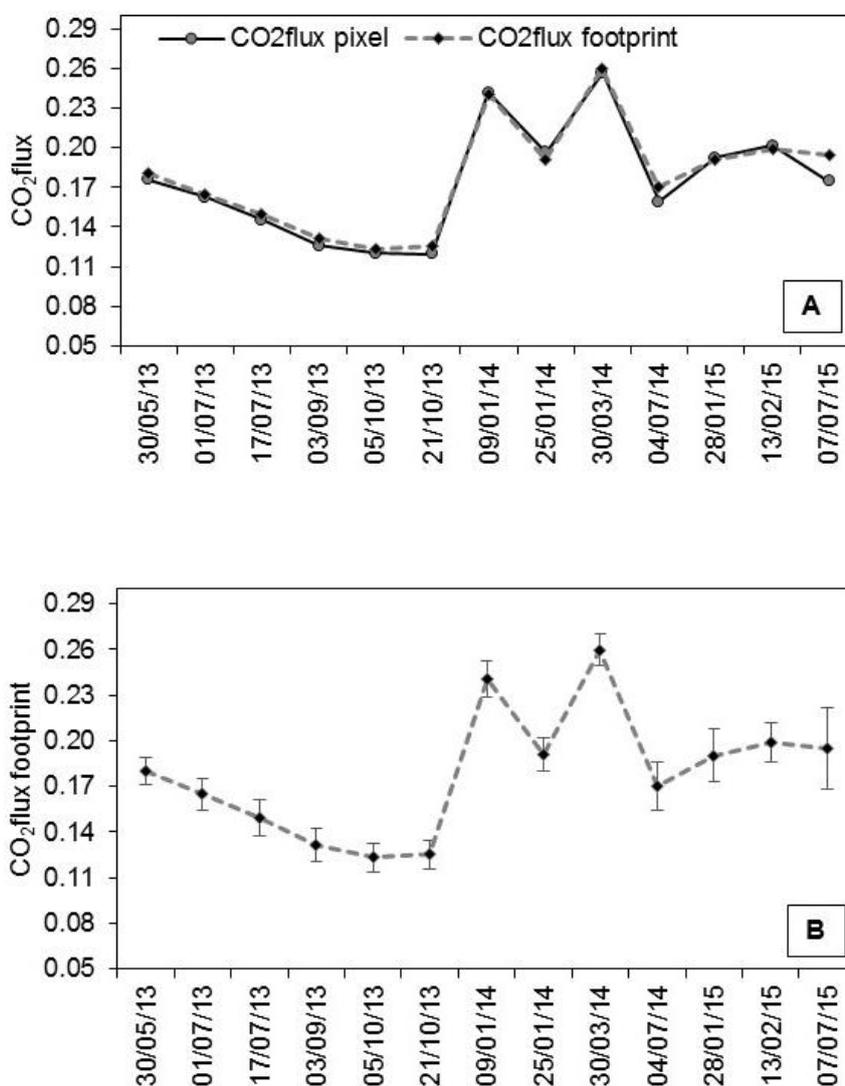
presença de nuvens, portanto, foram retirados parte do polígono onde os pixels estavam comprometidos pela presença de nuvens para garantir sua homogeneidade. A tabela 4 apresentam os percentuais de pixels aproveitados de cada cena, as quais foram comprometidas em parte com a presença de nuvens.

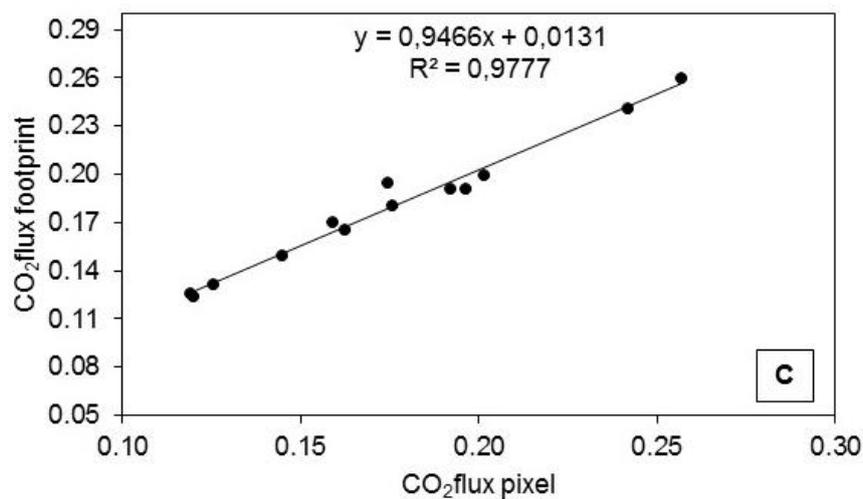
**Tabela 4:** Ajuste para remoção de pixels de nuvens do *footprint*. A tabela apresenta a quantidade (%) dos pixels aproveitados após a remoção dos pixels com presença de nuvens.

Área	Data	Pixels
Caatinga preservada	30/05/2013	100 %
	01/07/2013	99 %
	17/07/2013	100 %
	03/09/2013	100 %
	05/10/2013	100 %
	21/10/2013	100 %
	09/01/2014	93 %
	25/01/2014	100 %
	30/03/2014	100 %
	04/07/2014	100 %
	28/01/2015	85 %
	13/02/2015	100 %
	07/07/2015	87 %
Caatinga em regeneração	19/09/2013	100 %
	09/01/2014	36 %
	02/06/2014	100 %
	04/07/2014	100 %
	20/07/2014	100 %
	31/01/2016	100 %
	16/02/2016	100 %
	06/05/2016	80 %
22/05/2016	100 %	

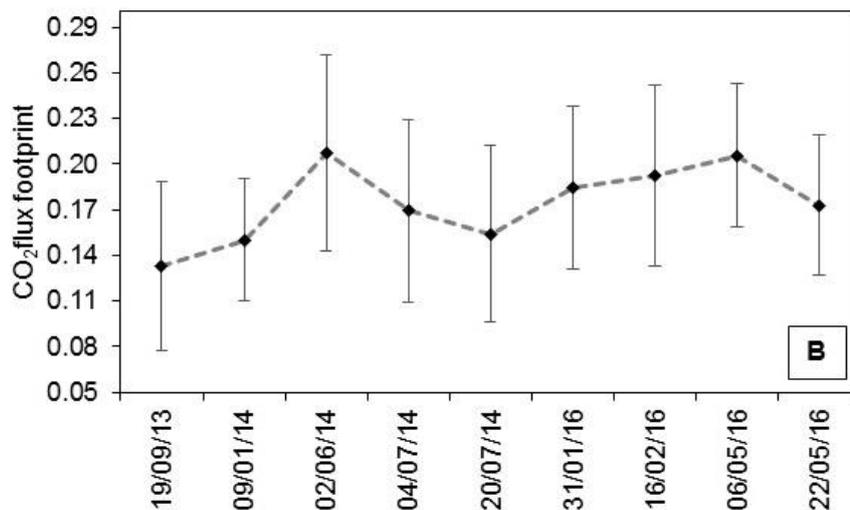
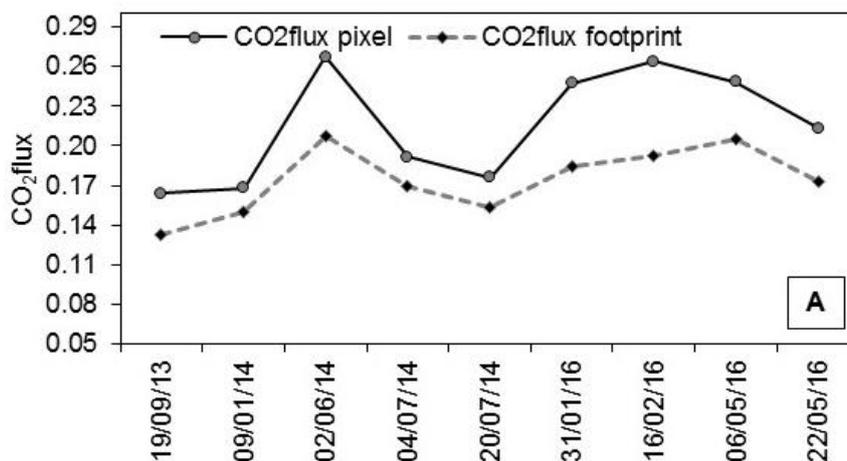
As figuras 16 e 17 apresentam as tendências temporais do índice CO<sub>2</sub>flux para as duas áreas estudadas, na qual, mostraram padrões semelhantes de médias nos valores espectrais do CO<sub>2</sub>flux *footprint* em relação ao valor de 1 pixel da imagem com CO<sub>2</sub>flux onde está localizada a torre. Embora, as áreas possuam grandes diversidades florestais, os índices mostraram homogeneidade nos dados apresentados ao longo do tempo para as áreas da Caatinga.

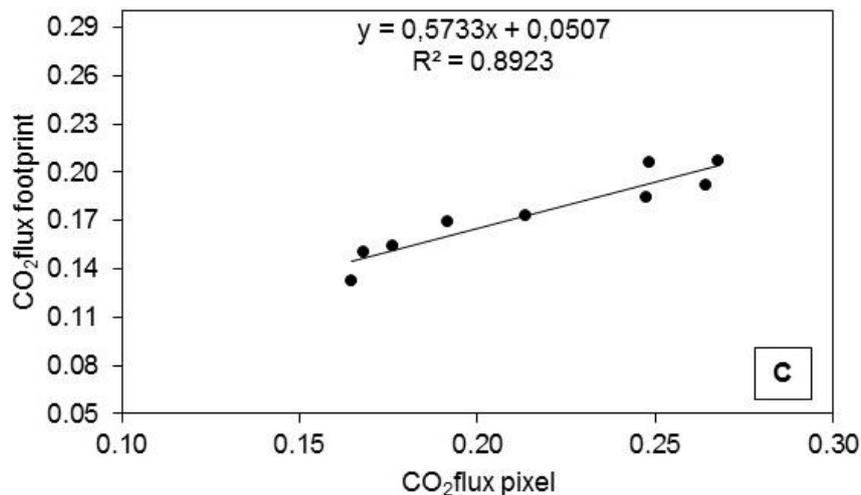
**Figura 16:** Padrão sazonal do índice CO<sub>2</sub>flux para a Caatinga preservada. A) CO<sub>2</sub>flux e CO<sub>2</sub>flux *footprint*; B) Desvio padrão do CO<sub>2</sub>flux *footprint* e C) Relação entre CO<sub>2</sub>flux e CO<sub>2</sub>flux *footprint*.





**Figura 17:** Padrão sazonal do índice CO<sub>2</sub>flux para a Caatinga em regeneração. A) CO<sub>2</sub>flux e CO<sub>2</sub>flux footprint; B) Desvio padrão do CO<sub>2</sub>flux footprint e C) Relação entre CO<sub>2</sub>flux e CO<sub>2</sub>flux footprint.





Observa-se também que de acordo com o resultado apresentado, há uma tendência de decréscimo nos valores do CO<sub>2</sub>flux em ambas as áreas de estudo que vão da estação chuvosa, na qual, a floresta se mantém como um sumidouro de carbono, no início do ano, à estação seca no final do ano, quando ela passa a emitir mais CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

As médias diárias do índice CO<sub>2</sub>flux *footprint* para a Caatinga preservada variou entre 0,12 e 0,26, com desvio padrão entre essas datas analisadas entre 0,01 e 0,03, já na Caatinga em regeneração, as médias do índice variaram entre 0,13 e 0,21, com desvio padrão entre 0,04 e 0,06. Outros resultados nos valores de CO<sub>2</sub>flux encontrados para essa região foram determinados por Grilo e colaboradores (2011), encontrando em áreas com predominância de Caatinga preservada e antropizada valores variando entre 0,19 e 0,31.

Os maiores desvios estão em épocas com imagem em períodos mais secos, o que é justificado pela diversidade florestal nesse período, pois de acordo com Lima Junior e colaboradores (2014) a irregularidade das chuvas na Caatinga interfere na produção da biomassa nessas áreas, apresentando grandes variações, tanto espacial como sazonal.

O déficit hídrico é um fator determinante nessa dinâmica, pois, diminui a atividade fotossintética da vegetação, o que vem a repercutir em alguns casos, em surgimento de solo exposto ou outros elementos que influenciam nas médias geradas no momento de aquisição da imagem por meio do sensor orbital, ocorrendo diminuição na quantidade de pixels homogêneos do conjunto dos valores, como ocorreu na área de influência da Torre 2, em que possui uma área

de vegetação de caatinga em regeneração menor em relação a área de influência das torres.

Com relação a representatividade do *footprint*, observa-se na figura 16a, que na área mais densa da Caatinga, o pixel e o *footprint* responderam de forma semelhante, o que difere no contexto de áreas menos densas, como a área em regeneração, que embora, apresentou um padrão de resposta semelhante, ocorreram pequenas variações em relação a área preservada. Tais diferenças encontradas nos pixels de uma área menos vegetada, podem ser justificadas por meio da pouca densidade de vegetação dessas áreas que estão em processo de recuperação, seja em períodos chuvosos ou secos. Outros fatores ligados a essas variações estão na influência de outros elementos perceptíveis na imagem, a exemplo, pixels com predominância de solo exposto.

Para compreender a representatividade da área de cobertura dos índices gerados (figura 16c e 17c), as variáveis foram consideradas em um grupo X ( $\text{CO}_2\text{flux}$ ) e um grupo Y ( $\text{CO}_2\text{flux footprint}$ ), utilizado um modelo de regressão linear entre elas, as quais apresentaram um coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,98$  para a Caatinga preservada e  $R^2 = 0,89$  para caatinga em regeneração, o que mostra uma relação linear forte na análise nas duas áreas de caatinga.

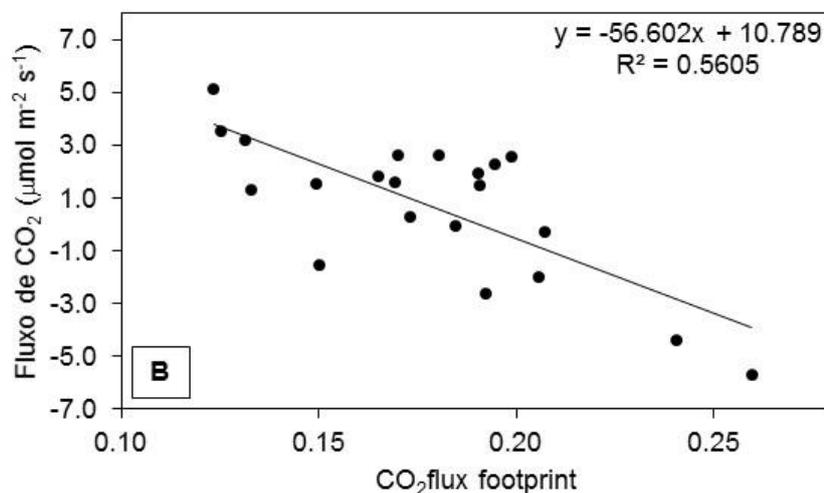
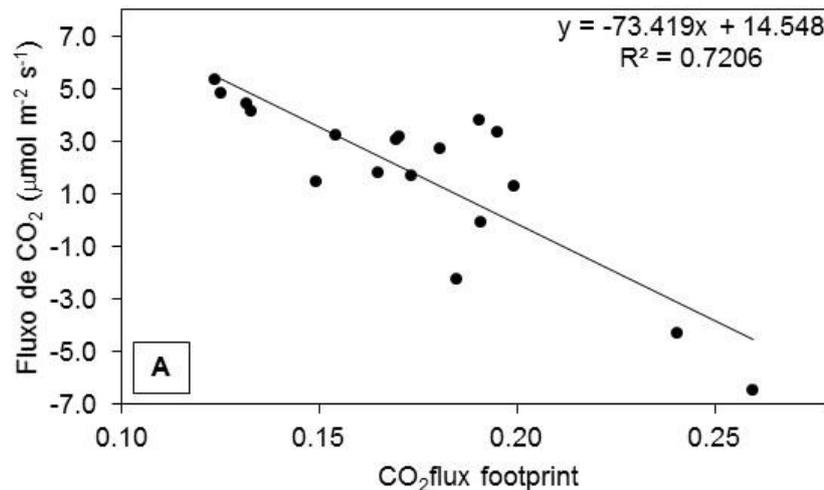
Assim como na análise pontual, foram realizados ajustes com o índice  $\text{CO}_2\text{flux footprint}$  com observações em meia, uma e duas horas, utilizando a médias dos pixels observados dentro das áreas de influência das torres micrometeorológicas, portanto, o objetivo também é verificar qual intervalo é mais representativo para a determinação dos modelos, considerando como variável independente (X) os valores do índice espectral obtido no processamento das imagens ( $\text{CO}_2\text{flux}$ ) e o dependente (Y) para o fluxo de  $\text{CO}_2$  medido por meio do sensor instalado nas torres micrometeorológicas.

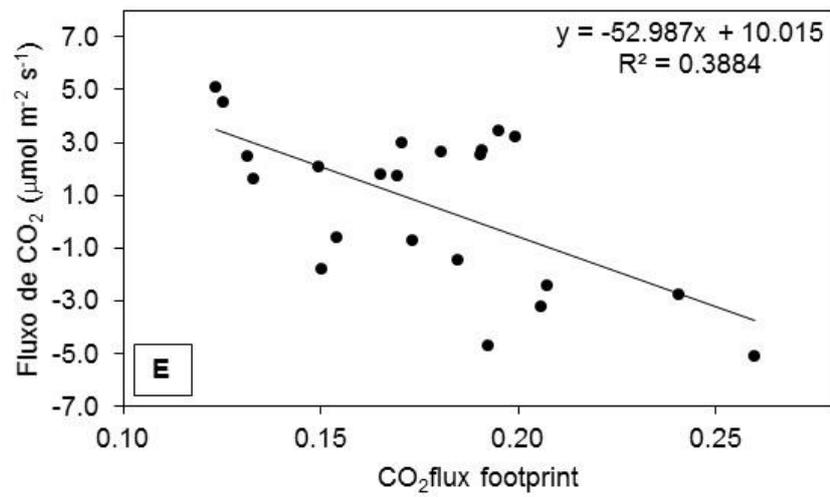
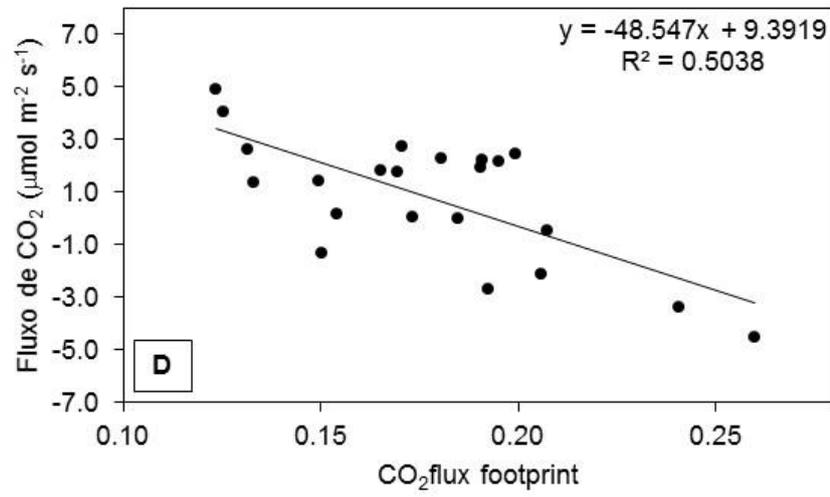
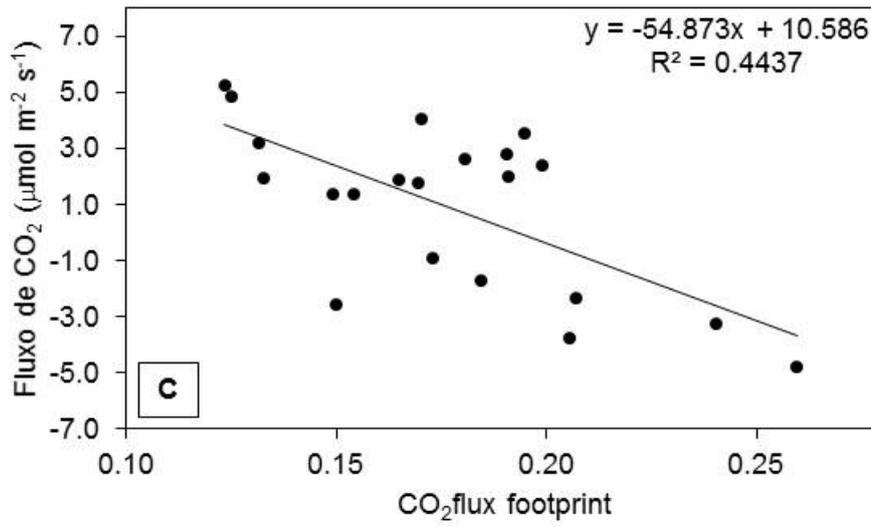
As duas variáveis foram analisadas também por meio de um coeficiente de determinação ajustando o modelo  $\text{CO}_2\text{flux footprint}$  a uma função linear. Os ajustes com os dados estão apresentados na figura 18, em seis grupos de análise.

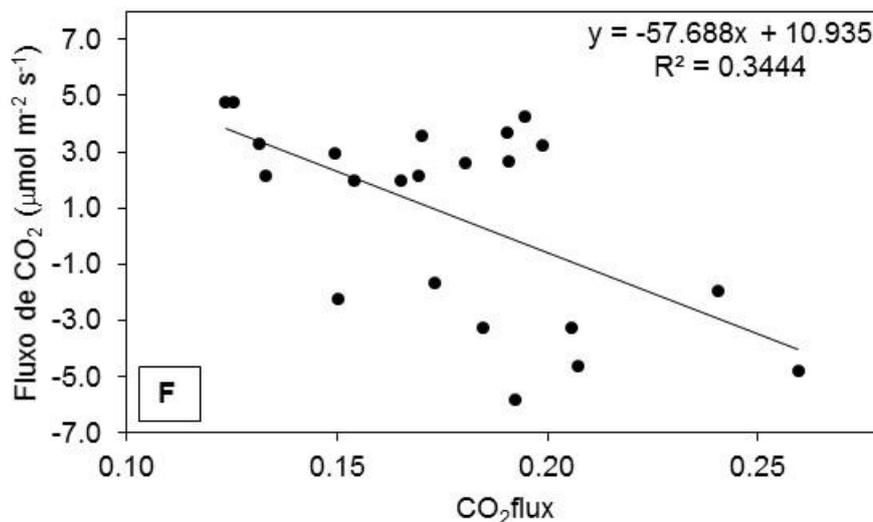
Os ajustes dos modelos junto aos dados de fluxos de  $\text{CO}_2$  ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) apresentaram coeficientes de determinação  $R^2 = 0,62$  para a observação em

meia hora,  $R^2 = 0,702$  para uma hora e  $R^2 = 0,7033$  para a observação a cada duas horas, onde duas horas apresentou o melhor coeficiente ajustado entre os dados, embora a análise de uma hora tenha representado de forma semelhante.

**Figura 18.** Ajustes do índice  $\text{CO}_2\text{flux footprint}$  com dados de fluxo de  $\text{CO}_2$  com observações em: A) meia hora (13:00), B) uma hora (12:30 e 13:00), C) uma hora (13:00 e 13:30), D) duas horas (12:00 a 13:30), E) duas horas (12:30 a 14:00) e F) duas horas (13:00 a 14:30).







Foi realizado o teste Shapiro-Wilk (teste W) (tabela 5) para a verificar a se o conjunto de dados possui uma distribuição normal.

**Tabela 5:** Teste de Normalidade (teste W).

Teste W	CO <sub>2</sub> flux OLI footprint	Fluxo de CO <sub>2</sub> (μmol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )		
		meia hora	uma hora	duas horas
N	22	22	22	22
p-valor	0,2683	0,0099	0,2532	0,3226

Como parte das populações no teste Shapiro-Wilk não apresentou distribuição normal (apenas o fluxo de CO<sub>2</sub> em meia hora), assim como foi realizado na análise pontual, foi utilizado para verificar a similaridade estatística entre as variáveis também o teste Wilcoxon-Mann-Whitney ou teste U.

De acordo com a tabela 6, existe similaridade estatística também entre as variáveis analisadas por meio do *footprint*, no qual, apresentou valores de  $p$  ( $p$ -valor = 0,1213) para observação em meia hora, ( $p$ -valor = 0,1242) para uma hora, e ( $p$ -valor = 0,2092) para duas horas ao nível de significância de  $\alpha=0,05$ , mostrando que não há diferença entre os dados espectrais correspondente a área de influência das torres nas imagens do sensor OLI e os dados medidos pelo sensor instalado na torre micrometeorológica nas áreas da Caatinga.

**Tabela 6:** Teste de Similaridade (teste U).

Teste U	Comparação entre		
	CO <sub>2</sub> flux OLI footprint e Fluxo de CO <sub>2</sub> ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )		
	meia hora	uma hora	duas horas
<i>p</i> -valor	0,1213	0,1242	0,2092

A modelagem dos fluxos de CO<sub>2</sub> com o uso do *footprint* nessas áreas em estudo indicaram que as áreas próximas aos sensores instalados nas torres micrometeorológicas se apresentaram de forma homogênea, representando bem a sazonalidade da vegetação em relação a dinâmica do carbono, com boa precisão nos resultados apresentados.

Portanto, ao se tratar das análises espaciais dos fluxos de CO<sub>2</sub> medidos em campo, com o índice CO<sub>2</sub>flux no pixel e com o CO<sub>2</sub>flux do *footprint*, de acordo com a análise dos modelos, tanto para observações a cada meia, uma e duas horas para as áreas de Caatinga preservada e em estado de regeneração, assim como na análise pontual, as variáveis analisadas apresentam similaridade e são estatisticamente significativas.

Resultados semelhantes a este foi encontrado por Pedroza da Silva e Baptista (2015) analisando diferentes áreas (Floresta primária, exploração seletiva de madeira, pastagem e área de transição Amazônia/Cerrado) da Amazônia, no qual mostrou que o modelo CO<sub>2</sub>flux pode ser aplicado com praticamente o mesmo nível de precisão para os fluxos de CO<sub>2</sub> tanto utilizando a leitura de 1 pixel na imagem quanto para o *footprint* das áreas a partir de uma observação a cada duas horas, apresentando ajustamentos elevados com um coeficientes R<sup>2</sup> = 0,87 e R<sup>2</sup> = 0,86, respectivamente, o que mostra que as variáveis analisadas também são similares e estatisticamente significativas.

#### **5.4. Modelagem de fluxo de CO<sub>2</sub> para as áreas de Caatinga preservada e em regeneração**

Os fluxos de CO<sub>2</sub> por meio das imagens OLI estão apresentados nas figuras 19 e 20. As figuras mostram as regiões onde estão localizadas as áreas de estudo com enfocando as áreas de influência dos locais onde se encontram as torres micrometeorológicas.

Ambas os locais estudados possuem áreas vegetadas e sistemas agroflorestais irrigados em seu entorno, o que veio a contribuir com a intensificação da atividade fotossintética da vegetação para os dias analisados.

A figura 19 apresenta a região do Vale do São Francisco com uma cena do sensor OLI registrada no dia 30 de maio de 2013, e a figura 20 a região do Araripe com cena registrada no dia 19 de setembro de 2013. Ambas as áreas estão sobre épocas em que houve pouco registro de chuvas últimos 30 dias que antecederam a aquisição das imagens, com registro inferior a 10 mm, e isso veio a proporcionar absorção de CO<sub>2</sub> nas áreas com vegetação mais tolerante ao déficit hídrico e nos sistemas agropecuários irrigados da região, principalmente os localizados as margens do Rio São Francisco. Nas demais áreas, por exemplo, agricultura ou pastagem, apresentaram fluxos mais positivos.

Tanto para a Caatinga preservada quanto na Caatinga em regeneração, um outro fator importante está no horário de imageamento, que está situado em um período do dia em que as plantas estão em processo intenso de absorção de CO<sub>2</sub>.

Figura 19: Modelagem de Fluxo de CO<sub>2</sub> na região de Petrolina - PE no Vale do São Francisco.

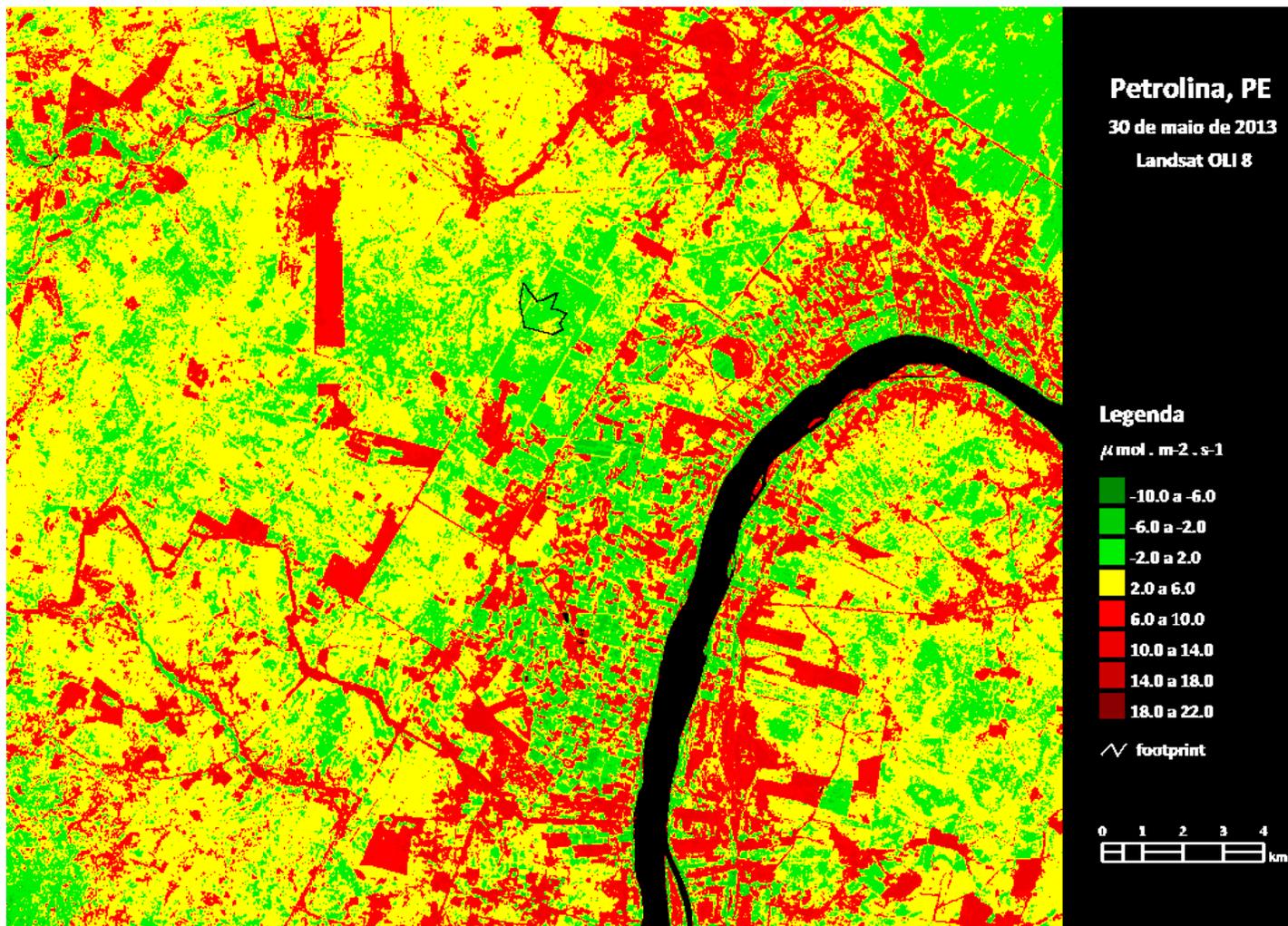
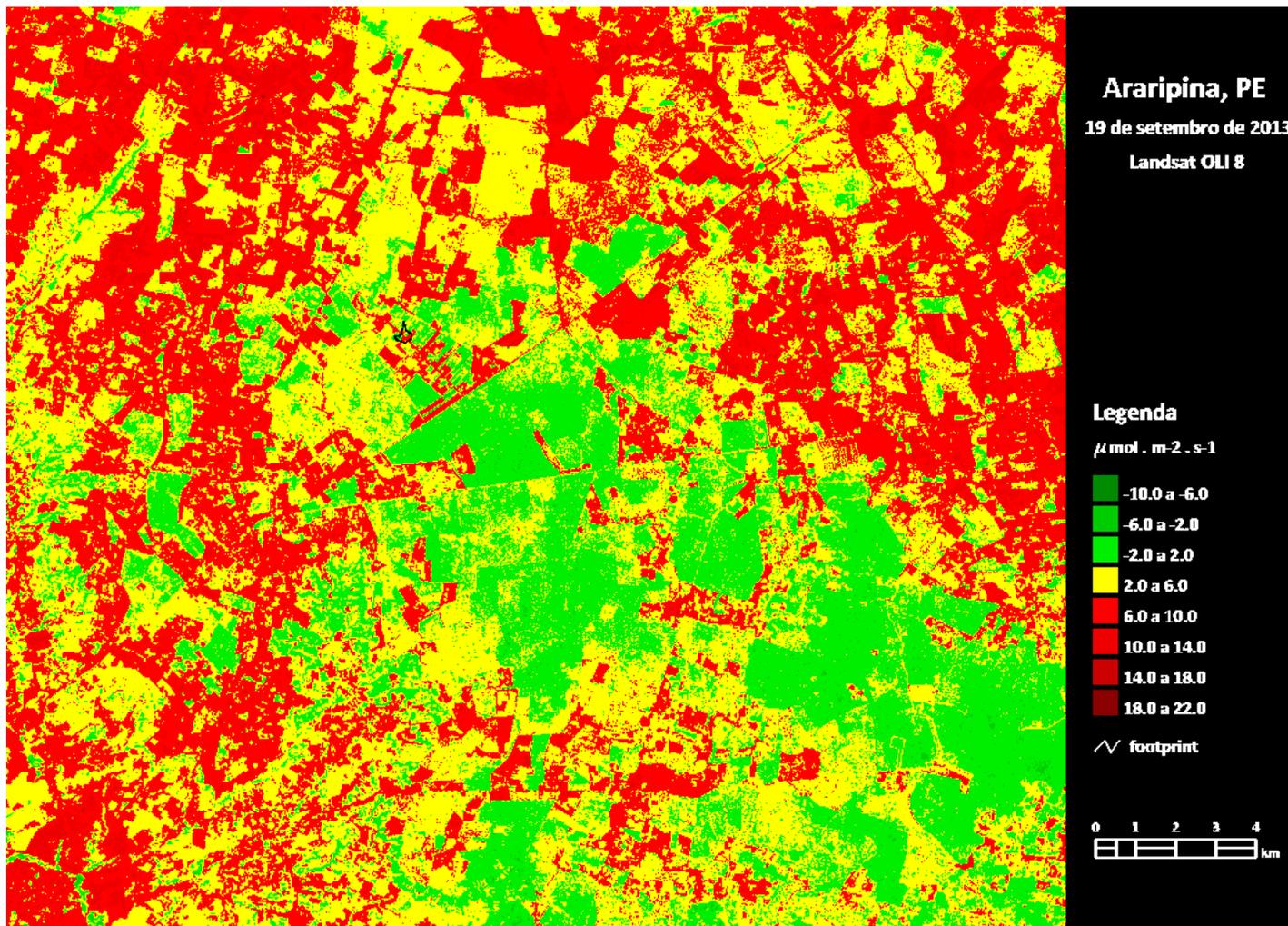


Figura 20: Modelagem de Fluxo de CO<sub>2</sub> na região de Araripina - PE na região do Araripe.



## 6. CONCLUSÕES

Por meio do sensoriamento remoto multiespectral foi possível identificar a dinâmica dos fluxos de CO<sub>2</sub> para áreas de Caatinga preservada e em regeneração, por meio da integração de dados orbitais e dados mensurados em campo utilizando escalas temporais e espaciais.

Os resultados da análise mostraram boas correlações entre as propriedades físicas da Caatinga e os Índices de Vegetação utilizados, capturando bem os efeitos das mudanças sazonais da dinâmica dos fluxos de CO<sub>2</sub> ao longo do período estudado, determinando tendências temporais nessa dinâmica em relação a análise pontual e espacial.

Portanto, é possível determinar modelos de fluxos de CO<sub>2</sub> por meio da análise do Índice de Sequestro Florestal de Carbono, no qual, obteve-se correlações significativas tanto para medições pontuais (1 pixel), como analisando por áreas de influência como as determinadas pelo *footprint* das áreas em torno das torres micrometeorológicas.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, R., G. **Fluxos de massa e energia em uma floresta tropical no sudoeste da Amazônia**. 2005. 78 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Cuiabá, 2005.
- AGUIAR, R. G.; RANDOW, C. V.; FILHO, N. P.; MANZI, A. O.; AGUIAR, L. J. G.; CARDOSO, F. L. Fluxos de massa e energia em uma floresta tropical no sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3b, p.248-257, 2006.
- ALVES, J. J. A.; ARAÚJO, M. A.; NASCIMENTO, S. S. Degradação da Caatinga. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 3 p. 126-135, 2009.
- AMORIM, I. L.; SAMPAIO, E.V.S.B.; ARAÚJO, E.L. Flora e estrutura da vegetação arbustivo arbórea de uma área de caatinga do Seridó, RN, Brasil. **Acta botânica brasílica**, vol. 19, n.3, p. 615-623, 2005.
- BAPTISTA, G. M. M. Mapeamento do sequestro de carbono e de domos urbanos de CO<sub>2</sub> em ambientes tropicais, por meio de sensoriamento remoto hiperspectral. **Geografia**, Rio Claro, v. 29, n. 2, p. 189-202, 2004.
- BAPTISTA, G. M. M. Validação da modelagem de sequestro de carbono para Ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados AVIRIS e HYPERION. In: **XI SBSR**, Belo Horizonte, Brasil, 05-10 abril 2003. Anais. São José dos Campos: INPE, p. 1037-1044, 2003.
- BRASIL. Ministério do Interior. **Mapa Geológico** – Escala 1:2. 500.000. SUDENE – Divisão de solos – DRN.1974.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Subsídios para a elaboração do plano de ação para a prevenção e controle do desmatamento na Caatinga**. Brasília, 2011.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003.
- CARVALHO JÚNIOR, O. A.; CARVALHO, A. P. F.; MENESES, P. R.; GUIMARÃES, R. F. Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperspectrais pela análise sequencial da transformação por fração de ruído mínima. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 20, n.1, 2002.
- CASTELLETTI, C.H.M., J.M.C. SILVA, M. TABARELLI & A.M.M. SANTOS. Quanto ainda resta da Caatinga? Uma estimativa preliminar. In: J.M.C. Silva, M. Tabarelli, M.T. Fonseca & L.V. Lins (org.). **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação**. pp. 91-100. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2004.
- CERQUEIRA. D. B.; FRANCA-ROCHA, W. J. S. Relação entre tipos de vegetação e fluxo de CO<sub>2</sub> no Bioma Caatinga: Estudo de caso em Rio de Contas - Ba. In: XIII SBSR, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007. **Anais**. São José dos Campos: INPE, p. 2413-2419, 2007.

CHANG, M. Sequestro de Carbono Florestal: oportunidades e riscos para o Brasil. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**. Curitiba, n. 102, p. 85-101, 2002.

CORREIA, R. C.; KIILL, L. H. P.; MOURA, M. S. B. de; CUNHA, T. J. F.; JESUS JUNIOR, L. A. de; ARAUJO, J. L. P. A região Semiárida Brasileira. In: Voltolini, T.V. (Org.). **Produção de caprinos e ovinos no semiárido**. 1ed. Petrolina-PE: Embrapa Semiárido, 2011, v. 1, p. 21-48.

DELLASALA, D.A. The Carbon Cycle and Global Change: Too Much of a Good Thing. **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**. Ashland, p.1-4, 2013.

EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE. **Satélites de monitoramento**. Disponível em [http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/missao\\_landsat.php](http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/missao_landsat.php). Acesso em 11 de abril de 2016.

EPIPHANIO, J. C. N.; GLERIANI, J. M.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 6, p. 445-454, 1996.

FALKOWSKI, P.; SCHOLLES, R. J.; BOYLE, E.; CANADELL, D.; CANFIELD, D.; ELSER, J.; GRUBER, N.; HIBBARD, K.; HOGBERG, P.; LINDER, S.; MACKENZIE, F. T.; MOORE, B.; PEDERSEN, T.; ROSENTHAL, S.; SEITZINGER, S.; SMETACEK, V.; STEFFEN, W. The Global Carbon Cycle: A Test of our knowledge of Earth as a System. **Science**, v. 290, p. 291-297, 2000.

FLEICHSHER, E.; KHASHIMOV, I.; HÖLZEL, N.; KLEMM, O. Carbon exchange fluxes over peatlands on Western Siberia; Possible feedback between land-use change and climate change. **Science of the Total Environment**. v. 545, p. 424-433, 2016.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. Oficina de Textos. São Paulo, 2007.

FUENTES, D. A.; GAMON, J. A.; CHENG, Y.; CLAUDIO, H. C.; QIU, H.; MAO, Z.; SIMS, D. A.; RAHMAN, A. F.; OECHEL, W.; LUO, H. Mapping carbon and water vapor fluxes in a chaparral ecosystem using vegetation indices derived from AVIRIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, p.312 - 323, 2006.

GAMON, J. A.; SERRANO, L.; SURFUS, J.S., "The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels". **Oecologia**, vol. 112, p. 492 - 501, 1997.

GIONGO, V.; CUNHA, T. J. F.; MENDES, A. S. M. GAVA, C. A. T. Carbono no Sistema Solo-Planta no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física** v. 6, p. 1233 - 253, 2011.

GRILO, D. C.; FRANCA-ROCHA, W. J. S.; BORGES, E.F.; PETRERE, V. G.; ARAÚJO, D. M. B. Mapeamento do fluxo de CO<sub>2</sub> em ambientes de Caatinga e de sistemas agropecuário por meio de imagens orbitais. In: XV SBSR, Curitiba,

Brasil, 30/04 a 05/05- 2011. **Anais**. São José dos Campos: INPE, p. 1682-1689, 2011.

GRILO, D. C. **Modelagem de fluxo de carbono em paisagens de Caatinga e em sistemas agropecuários**. 2012. 115p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, 2012.

GUSMÃO, L. F. P.; QUEIROZ, L. P.; QUIJANO, F. R. B.; JUNCÁ, F. A.; OLIVEIRA, R. P.; BASEIA, I. G. Caatinga: Diversidade na Adversidade do Semiárido Brasileiro. In: PEIXOTO, A. L.; LUZ, J. R. P.; BRITO, M. A. **Conhecendo a Biodiversidade**. p. 100-111. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2016.

JACOMINE, P. K. T. Solos sob caatingas – características e uso agrícola. In: ALVAREZ V. V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. **O solo nos grandes domínios mórfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: SBSC; UFV; DPS, 1996.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**; tradução José Carlos Neves Epiphânio (coordenador) ... [et al.]. Parêntese: São Paulo, 2009.

KIILL, L. H. P.; MENEZES, E. A. A Região Semiárida Brasileira. In: KIILL, L. H. P.; MENEZES, E. A. (Org.) . **Espécies vegetais exóticas com potencialidades para o Semiárido Brasileiro**. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2005. v. 1. 335p.

LATORRE, M.; CARVALHO JÚNIOR O.A.; CARVALHO, A.P.F., SHIMABUKURO, Y.E. Correção Atmosférica: Conceitos e Fundamentos. **Espaço & Geografia**, v. 5, p. 153-178, 2002.

LEITE, L. F. C.; PETRERE, V. G.; SAGRILO, E. Sequestro de carbono em solos da região Semiárida brasileira estimado por modelo de simulação em diferentes sistemas produtivos. In: ICID+18, Fortaleza, Brasil, 16-20 agosto 2010. **Anais**. Fortaleza, 2010.

LEMO, A. L. F.; VITAL, M. H. F.; PINTO, M. A. C. As florestas e o painel de mudanças climáticas da ONU. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 32, p. 153-192, set. 2010.

LIMA JUNIOR, C.; ACCIOLY, L. J. O.; GIONGO, V.; LIMA, R. L. F. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; MENEZES, R. S.C. Estimativa de biomassa lenhosa da Caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, p. 289-298, 2014.

LIU, H. & RODRÍGUEZ, G. Human activities and global warming: a cointegration analysis. **Environmental Modelling & Software**, v. 20, n. 6, p. 761–773, 2005.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**. v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.

MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. D&Z: São Paulo, 2004.

MAJEROWICH, N. Fotossíntese. In: KERBAUY, G.B. **Fisiologia Vegetal**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008. 431p.

MENESES, P. R. Princípios de sensoriamento remoto. In: **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). UnB: Brasília, 2012.

MARENCO, R. A.; ANTEZANA-VERA, S. A.; GOUVÊA, P. R. S.; CAMARGO, M. A. B.; OLIVEIRA, M. F.; SANTOS, J. K. S. Fisiologia de espécies florestais da Amazônia: fotossíntese, respiração e relações hídricas. **Revista Ceres**. v. 61, p. 786-799, 2014.

MASCARENHAS, L. M. A.; FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L.G. Sensoriamento Remoto como instrumento de controle e proteção ambiental: Análise da cobertura vegetal remanescente na Bacia do Rio Araguaia. **Sociedade & Natureza**, v. 21, n. 1, p. 5-18, 2009.

MOLION, L.C.B. Aquecimento Global: Uma visão crítica. **Revista Brasileira de Climatologia**. v.3, n.4, p. 7-24, 2008.

MOURA, V.; VON RANDOW, C.; MANZI, A. O. Estimativa do footprint de torres em área de platô e baixio na Reserva Cuieiras, Amazônia Central. In: V Workshop Brasileiro de Micrometeorologia. **Anais**, 2007.

OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, A. J. B.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C. S.; CORREIA, M. F.; MOURA, M. S. B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de Caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, p.166-174, 2006.

PEDROZA DA SILVA, S. C. **Modelagem Espectral para determinação da concentração e fluxos de CO<sub>2</sub> em paisagens naturais e antrópicas na região Amazônica**. 2014. 173p. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, 2014.

PEDROZA DA SILVA, S. C.; BAPTISTA, G. M. 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**, v.21, n. 2, p.354-370, 2015.

PEDROZA DA SILVA, S. C.; BAPTISTA, G. M. Modelagens de sequestro de Carbono e dos conteúdos de CO<sub>2</sub> atmosférico com dados Hyperion em diferentes ambientes na Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 7, p. 1509-1521, 2015.

PEREIRA, D. D.; PEREIRA, F. C. Ecologia das Caatingas. In: ROCHA, A. P. T.; ABREU, B. S.; FURTADO, D. A.; BARACUHY, J. G. V.; FERNANDES NETO, S. (Org). **Manejo ecológico integrado das bacias hidrográficas do semiárido brasileiro**. Campina Grande: EPGRAF, 2011.

PIMENTEL, C. Metabolismo de Carbono de plantas cultivadas e o aumento de CO<sub>2</sub> e de O<sub>3</sub> atmosférico: situação e previsões. **Bragantia**, Campina, v. 70, n. 1, p. 1-12, 2011.

PIRES, W, N. **Análise da sazonalidade dos fluxos de energia, CO<sub>2</sub> e dos aspectos ecofisiológicos em uma área de Caatinga degradada na região da Chapada do Araripe**. 2015. X f. Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF. Juazeiro-BA.

PIRES, W. N.; MOURA, M. S. B.; RODRIGUES, G. D. S.; LACERDA, F. F. Radiação Fotossinteticamente Ativa durante o período chuvoso em vegetação de caatinga em regeneração na Chapada do Araripe – PE. In: II CIRS e III SASES, Delmiro Gouveia, Brasil, 11-15 novembro 2014. **Anais**. Delmiro Gouveia. 2014.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos, SP: A. Silva Vieira Ed., 2007.

RAHMAN, A. F.; GAMON, J. A.; FUENTES, D. A.; ROBERTS, D. A.; PRENTISS, D. Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery. **Journal of Geophysical Research**, vol. 106, no. D24, pages 33,579-33,591, 2001.

RAHMAN, A.F.; GAMON, J.A.; FUENTES, D.A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. Modeling CO<sub>2</sub> flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. In: AVIRIS Workshop. Proceedings. **Anais...** JPL/NASA, Pasadena, Califórnia, 2000.

ROCHA, A. P. T.; ABREU, B. S.; FURTADO, D. A.; BARACUHY, J. G. V.; FERNANDES NETO, S. (Org). **Manejo integrado de bacias hidrográficas no semiárido brasileiro**. Campina Grande: EPGRAF, 2011.

RODRIGUES, C. P.; FONTANA, D. C.; MORAES, O. L. L.; ROBERT, D. R. NDVI e fluxo de CO<sub>2</sub> em lavoura de soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n.1, 95 - 104, 2013.

ROUSE, J. W.; HAAS, R.H., SCHELL, J.A.; DEERING, D.W., “Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS”. In: Proceeding of ERTS-1 Symposium. **Anais** ... NASA, United States, n. 3, p. 309-317, 1973.

SÁ, I. B.; DRUMOND, M. A.; CUNHA, T. J.F.; TAURA, T. A. Mapeamento da cobertura vegetal e uso das terras do Bioma Caatinga. In: ICID+18, Fortaleza, Brasil, 16-20 agosto 2010. **Anais**. Fortaleza, 2010.

SÁ, I. I. S.; GALVÍNCIO. J. D.; MOURA, M. S. B.; SÁ, I. B. Uso do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN) para caracterização da Cobertura Vegetal da região do Araripe Pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 1, n. 1, p. 28-38, 2008, Recife.

SAMPAIO, E. V. S. B. Caracterização do Bioma Caatinga. In: GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga**. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2010.

SAMPAIO, E. V. S. B.; COSTA, T. L. Estoques e fluxos de carbono no semiárido nordestino: Estimativas Preliminares. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, p. 12, 75-1291, 2011.

SANTANA, M. S. **Estoques de Carbono e Nitrogênio em solos do sertão pernambucano sob diferentes usos**. 2015. 61p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

SILVA, B. B.; GALVINCIO, J. D.; BORGES, V. P.; MACHADO, C. C. C. Estimativa do sequestro de carbono por sensoriamento remoto. In: GALVÍNCIO,

J. D. (Org.). **Mudanças climáticas e modelos ambientais**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2012. P. 51-70.

SILVA JUNIOR, R. S.; MOURA, M. A. L.; MEIXNER, F. X.; KORMANN, R.; LYRA, R. F. F.; NASCIMENTO FILHO, M. F. Estudo da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico em área de pastagem na região Amazônica. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22, n. 3, p.259-270, 2004.

SILVA, P. F. **Fluxos de CO<sub>2</sub>, Água e energia em Pastagens e Caatinga no Semiárido Pernambucano**. 2015. 51p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2015.

SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n. 8, p. 627-636, 2015.

TOTH, C.; JÓZKÓW, G. Remote sensing platforms and sensors; a survey. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. p.1-15, 2015.

TROVÃO, D. M. B. M. Variações sazonais de aspectos fisiológicos de espécies da Caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v. 11, n. 3, p. 307-311, 2007.

VELLOSO, A.L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; PAREYN, F. G. C. **Ecorregiões Propostas para o Bioma Caatinga**. TNC-Brasil, Associação Plantas do Nordeste, Recife, 2002.

VIEIRA, G.; SANQUETTA, C.R.; KLUPPEL, M. L. W.; BARBEIRO, L. S. S. B. Teores de Carbono em espécies vegetais da Caatinga e do Cerrado. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 7, n. 2, p. 145-155, 2009, Curitiba.

VIVALDI, D. D.; BAPTISTA, G. M. M.; MENESES, P. R. Avaliação dos processamentos de crosstalk e de correção atmosférica em dados ASTER para identificação da relação mineralógica caulinita/ (caulinita + gibbsita) em solos no município de São João d'Aliança (GO). **Brazilian Journal of Geology**, v. 43, p. 571-582, 2013.

ZHAO, J.; CHEN, X.; BAO, A. M. Spatial representativeness of eddy covariance measurements using footprint analysis in arid areas. **Environmental Earth Science**, v. 71, n. 4, p.1691–1697, 2014.