

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
MARCOS VICENTE BATISTA FELIX

**VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DO ESTOQUE DE CARBONO E  
ÍNDICE DE VEGETAÇÃO EM UMA ÁREA DE CAATINGA POR MEIO DE  
SENSORIAMENTO REMOTO**

RECIFE  
2013

MARCOS VICENTE BATISTA FELIX

**VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DO ESTOQUE DE CARBONO E  
ÍNDICE DE VEGETAÇÃO EM UMA ÁREA DE CAATINGA POR MEIO DE  
SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do Título de **Mestre** em Engenharia Agrícola.

Orientador:

Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura.

Co-orientador:

Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes

RECIFE

2013

Ficha catalográfica

F316v Felix, Marcos Vicente Batista  
Variabilidade espaço temporal do estoque de carbono e índice de vegetação em uma área de caatinga por meio de sensoriamento remoto / Marcos Vicente Batista Felix. -- Recife, 2013.  
56 f. : il.

Orientador: Geber Barbosa de Albuquerque Moura.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Tecnologia Rural , Recife, 2013.  
Inclui referências, anexo(s) e apêndice(s).

1. Caatinga 2. NDVI 3. GPP 4. Sensoriamento remoto  
I. Moura, Geber Barbosa de Albuquerque, orientador II. Título

CDD 630

MARCOS VICENTE BATISTA FELIX

**VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DO ESTOQUE DE CARBONO E  
ÍNDICE DE VEGETAÇÃO EM UMA ÁREA DE CAATINGA POR MEIO DE  
SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação aprovada pela banca examinadora à baixo relacionada para obtenção do  
Título de Mestre em Engenharia Agrícola pelo Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Recife, 30 de Julho de 2013.

**Banca examinadora**

---

**Professor Doutor Bernardo Barbosa da Silva  
Examinador externo**

---

**Professor Doutor Ênio Farias de França e Silva  
Examinador interno**

---

**Professor Doutor Fabrício Marcos Oliveira Lopes  
Co-orientador**

---

**Professor Doutor Geber Barbosa de Albuquerque Moura  
Orientador**

*A minha mãe Dona Edileuza  
Batista Félix, pelo tempo e  
paciência dedicados à minha  
educação.*

**DEDICO**

*A lei do Senhor é perfeita e refrigera a alma; o testemunho do Senhor é fiel e dá sabedoria aos simples.*

***Salmo 19:7***

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu grande e eterno Deus, por ter me concedido o dom da vida, a força para superar as dificuldades e a destreza para não curvar a cabeça diante das adversidades.

A minha gratidão à Universidade Federal Rural de Pernambuco pelo aprendizado e oportunidade de crescer em cidadania e aos professores do curso pelos conhecimentos e experiências transmitidas.

Pelo acolhimento, aprendizagem e apoio, registro minha gratidão ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da UFRPE, bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa concedida.

A minha família, pelo apoio, carinho e compreensão, em especial aos meus pais, senhor Benedito e a senhora Edileuza Felix, que sempre me incentivaram, aos meus quatro irmãos, Augusto, Andreza, Daniel e Rosângela Félix, que sempre acreditaram em mim e me ajudaram em tudo que estava aos seus alcances.

Ao meu orientador prof. Dr. Geber Moura pelo apoio, confiança, conselhos e ensinamentos sobre a vida, com ele aprendi que não importa o tamanho da dificuldade, devemos sempre enfrentá-las com determinação e confiança, além dos valiosos ensinamentos acadêmicos.

Ao prof. Dr. Pabrcio Marcos pela orientação a mim prestada, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho da forma como foi realizado.

Ao prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva, pelos seus ensinamentos não só acadêmico, mas de vida, e por sua disponibilidade e simplicidade de sempre estar pronto a ajudar - Registro minha gratidão e admiração.

Ao prof. Ênio Farias pela ajuda e colaboração na finalização deste trabalho.

Aos amigos da Pós-Graduação pelos momentos compartilhados, companheirismo e apoio nas horas mais difíceis – Joel, Rochele, Luiz, Vinicius, Renato, Mara e Alan.

Por fim, sou grato a todos que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa da localização e elevação do Município de Floresta-PE.....	29
<b>Figura 2.</b> Fluxograma do processo para obtenção da GPP por imagem TM.....	31
<b>Figura 3.</b> Fluxograma do processo para obtenção da GPP por imagem MODIS - produto MOD09GA.....	36
<b>Figura 4</b> - Distribuição mensal da precipitação para Floresta-PE, em 1985 e 2009 .....	38
<b>Figura 5</b> - Distribuição quinzenal da precipitação (prec.) e NDVI-produto MOD13Q1-para o município de Floresta-PE, em 2009 .....	39
<b>Figura 6</b> - Diagrama de dispersão entre NDVI's gerados por imagem do produto MOD09GA e do sensor TM, para o mesmo local, nas datas de 21 de novembro de 2009 para MODIS e 20 de novembro de 2009 para o TM .....	41
<b>Figura 7</b> - Mapa do NDVI gerado por imagem do produto MOD09GA em 21 de novembro de 2009 e por imagem do sensor TM em 20 de novembro de 2009 para o município de Floresta-PE .....	41
<b>Figura 8</b> - Diagrama de dispersão da GPP versus o NDVI estimados por imagem do sensor TM em 20 de novembro de 2009 para o município de Floresta-PE.....	42
<b>Figura 9</b> - Histograma de frequência da GPP gerada por imagem do sensor TM em 20 de novembro de 2009 para o município de Floresta-PE.....	43
<b>Figura 10</b> - Histograma de frequência da GPP gerada por imagem do produto MOD09GA em 21 de novembro de 2009 para o município Floresta-PE .....	43
<b>Figura 11</b> - Mapa da GPP estimada por imagem MOD09GA em 21 de novembro e TM em 20 de novembro de 2009 para o município de Floresta-PE.....	44
<b>Figura 12</b> - Diagrama de dispersão entre GPP estimada por imagem MOD09GA em 21 de novembro e TM em 20 de novembro de 2009 para o município de Floresta-PE.....	45
<b>Figura 13</b> - Mapa do NDVI em 18 de novembro de 1985 e 20 de novembro de 2009 obtidos por imagens do sensor TM para o município de Floresta-PE.....	47
<b>Figura 14</b> - A- GPP estimada por imagem TM para área degradada, moderadamente degradada e conservada em 20 de novembro de 1985. B- GPP estimada por imagem TM para as mesmas áreas em 20 de novembro de 2009 .....	48
<b>Figura 15</b> - Mapa da GPP estimada para 18 de novembro de 1985 e 20 de novembro de 2009, ambos por imagens TM para o município de Floresta-PE .....	50

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Informações Imagens TM .....	30
<b>Tabela 2</b> - Média da temperatura da superfície e NDVI estimados por imagem TM e registro de precipitação do mês de novembro ate a data da geração da imagem para o município de Floresta-PE .....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AVHRR** - Advance Very High Resolution Radiometer
- CAM** - Mecanismo do Ácido das Crassuláceas
- CE** - Covariância de vórtice turbulento
- DAM** - Desvio Absoluto Médio
- EVI** - Enhanced Vegetation Index
- fRFAA** - Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida
- GPP** - Gross Primary Production
- h** – hora
- INMET** - Instituto Nacional de Meteorologia
- INPE** - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- LANDSAT** - Land Remote Sensing Satellite
- MMA** - Ministério do Meio Ambiente
- MODIS** - Moderate Resolucion Imaging Spectroradiometer
- NASA** - National Aeronautics and Space Administration
- ND** - Número Digital
- NDVI** - Normalized Difference Vegetation Index
- NOAA** - National Oceanic and Atmospheric Administration
- RDQM** - Raiz de Desvio Quadrado Médio
- RFA** - Radiação Fotossinteticamente Ativa
- RFAA** - Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida
- RFAI** - Radiação Fotossinteticamente Ativa Incidente
- R<sub>g</sub>** - Radiação global
- SPOT** - System for Earth Observation
- SRTM** - Shuttle Radar Topographic Mission
- SUDENE** - Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
- TM** - Thematic Mapper
- VPM** - Modelo de Fotossíntese da Radiação

## LISTA DE SÍMBOLOS

' – Minuto

" – Segundo

° - Graus

**C** – Carbono

**CO<sub>2</sub>** - Gás Carbônico

**dr** - Quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol e a distância Terra-Sol em dado dia

**km** – Quilômetro

**K<sub>λi</sub>** - Irradiância espectral de cada banda

**L<sub>λi</sub>** - Radiância espectral

**m** – Metro

**nm** – Nanômetro

**Ro** - Radiação solar no topo da atmosfera

**Z** - Ângulo Zenital

**ε** - Eficiência no uso da luz

**μm** – Micrômetro

**ρ<sub>λi</sub>** - Reflectância espectral

**Φ** – Latitude

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	x
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xi
RESUMO .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
1 INTRODUÇÃO.....	16
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	19
2.1 Caatinga .....	19
2.2 Sensoriamento Remoto .....	21
2.2.1 Produtos do Sensor MODIS .....	23
2.2.2 Sensor TM.....	24
2.3 Índices de vegetação .....	25
2.4 Produtividade Primária Bruta (GPP) .....	27
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1 Área de estudo .....	29
3.2 Dados orbitais .....	29
3.2.1 Imagens Landsat 5 .....	29
3.2.2 Produtos MODIS .....	30
3.3 Dados meteorológicos .....	31
3.4 Estimativa da Produtividade Primária Bruta .....	31
3.4.1 GPP por Imagens TM .....	31
3.4.1.1 Radiância espectral.....	32
3.4.1.2 Reflectância espectral.....	32
3.4.1.3 NDVI.....	33
3.4.1.4 fARFA.....	33
3.4.1.5 Radiação solar global .....	33
3.4.1.6 RFA .....	34
3.4.1.7 RFAA .....	34
3.4.1.8 Eficiência do uso da luz .....	34
3.5 GPP por imagens MODIS.....	36
4 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
5.1 Dados Pluviométricos.....	38

5.2	Varição quinzenal do NDVI por imagens do produto MOD13Q1 para 2009 ...	38
5.3	Relação entre NDVI MODIS - MOD09GA - e NDVI TM.....	39
5.4	GPP estimada por imagem do sensor TM e produtos MODIS para 2009.....	41
5.5	Correlação entre imagem do sensor TM e o produto MOD09GA .....	44
5.6	Análise temporal do NDVI por imagens do sensor TM.....	45
5.7	Análise temporal da GPP por imagens do sensor TM.....	47
6	CONCLUSÕES .....	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	52

## RESUMO

Técnicas de sensoriamento remoto vêm sendo frequentemente usadas no monitoramento ambiental em diversos ecossistemas, em razão da possibilidade de se alcançar áreas de grandes dimensões e também pelo acesso a áreas remotas. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo estimar a variação interanual da quantidade de carbono armazenado e o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) em uma área de caatinga no município de Floresta no Estado de Pernambuco, como também verificar a correlação entre os sensores TM (*Thematic Mapper*) do satélite Landsat 5 e o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) do satélite Terra. Além disso, analisou-se a variação, a cada 16 dias ao longo de todo ano de 2009, do NDVI, relacionando-os com a precipitação no mesmo período, usando imagens MOD13Q1. É notável a resposta da vegetação da caatinga à precipitação pluvial. Verificou-se, ao longo do ano de 2009, que à medida que aumentou a precipitação, houve também um acréscimo no NDVI. A correlação entre GPP e NDVI obtida pelas imagens TM e MOD09GA nas datas de 20 de novembro de 2009 e 21 de novembro de 2009, respectivamente, mostra-se capaz de explicar a variação dos dados pelo modelo linear em 53% para o NDVI e 56% para a GPP. O resultado da GPP estimada pela imagem do sensor TM de 18 de novembro de 1985 e TM 20 de novembro de 2009 mostra um acentuado decréscimo, com média de  $1,93 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  e  $0,16 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , respectivamente, o que nos leva à hipótese de que houve uma diminuição da área com vegetação, possivelmente pela ação antrópica com extração de madeira ou pela expansão da pecuária extensiva.

**Palavras-chave:** Caatinga, NDVI, GPP, Sensoriamento Remoto.

## ABSTRACT

Remote sensing techniques have often been used in environmental monitoring in different ecosystems, because of its capacity of involving large area and access to remote areas. Thus, this study aimed to estimate the annual variation of amount of carbon stored and NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) in caatinga area located at Floresta, Pernambuco state, as well as to verify the correlation between TM sensors (*Thematic Mapper*) provided by Landsat 5 satellite and MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) provided by TERRA satellite. Furthermore, analyzed a variation, in each 16 days during 2009, of NDVI, relating them to precipitation in the same period, using MOD13Q1 images. The response of caatinga vegetation to precipitation is remarkable. It was reported, during the year of 2009, as the precipitation increased, there was an addition in NDVI. The correlation between GPP and NDVI obtained by TM and MOD09GA images on november 20, 2009, and november 21, 2009, respectively, it is able to explain the data variation by linear method in 53% for NDVI and 56% for GPP.

The result of GPP estimated by images of TM sensor in november 18, 1985, and november 20, 2009, has a serious decrease, in average of  $1.93 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  and  $0.16 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , respectively, which suggest the hypothesis of a reduction of area with vegetation, possibly by anthropic action with wood extraction or expansion of extensive livestock farming.

**Keywords:** Caatinga, NDVI, GPP, Remote Sensing.

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, a busca por novas áreas para expansão agropecuária, a extração de madeiras, dentre outros fatores, tendem a elevar a ocupação de terras sobre diferentes biomas brasileiros. A baixa eficiência na exploração da terra, devido a uma pecuária arcaica, é um fator que contribui significativamente para demanda de novas terras, principalmente em regiões onde há predominância da pecuária extensiva, demandando grandes áreas para proceder com a atividade.

Neste contexto está inserida a Caatinga, um bioma que ocupa cerca de 70% da região Nordeste e 11% do território nacional (BUCHER, 1982). Sendo que menos de 2% da Caatinga estão protegidos em unidades de conservação de proteção integral (TABARELLI & VICENTE, 2003). Isso evidencia o descaso com esse bioma que é considerado um ambiente altamente propício à desertificação e só a vegetação nativa adaptada às condições locais poderia impedir a transformação dessa parte do Nordeste brasileiro num imenso deserto (GARDA, 1996).

Em geral, quando se trata do semiárido nordestino, há uma predominância da agricultura de subsistência e esta, exceto os locais situados no perímetro irrigado, é baseada em cultivo de sequeiro e a pecuária é conduzida de forma extensiva, ambos utilizando baixos padrões tecnológicos, além de estarem descapitalizadas e vulneráveis às variações climáticas. Além do mais, as populações dependentes dessas atividades, principalmente as menos favorecidas, na maior parte das situações exploram o extrativismo vegetal (exploração da caatinga através da venda de lenha e/ou de carvão) (ARAÚJO FILHO et al., 2001).

A exploração não sustentável do bioma caatinga tem intensificado seu processo de degradação, salientando que se trata de um ecossistema com toda sua totalidade situada no território brasileiro e não sendo encontrado em nenhum outro ambiente, o que só reforça a real necessidade de adoção de medidas que visem sua conservação e preservação. Neste sentido há sempre a necessidade de estudos que apontem melhoria nos mecanismos de monitoramento e de preservação desse ambiente. Dessa forma, o sensoriamento remoto é uma ferramenta de grande valia na execução do monitoramento ambiental em grandes áreas que dificilmente poderia ser feito de forma simultânea, em razão da extensão e das dificuldades do acesso a certos locais.

Neste sentido, a GPP (Produtividade Primária Bruta), e os Índices de vegetação são bons indicativos das alterações na densidade vegetativa de áreas florestais. A GPP

expressa a quantidade total de carbono armazenada pela vegetação, não contabilizados os utilizados no processo respiratório, assim, é possível fazer um estudo comparativo do quanto a vegetação deixou de armazenar ou incrementou de carbono em sua estrutura em datas distintas. Os índices de vegetação são dados que variam em função da densidade da vegetação e possibilitam a mensuração do vigor da vegetação. Dessa forma, são bons indicativos quando se pretende verificar e monitorar a variação do vigor e/ou supressão da vegetação, ao longo do tempo.

Inúmeros estudos que abordam a quantificação de carbono em florestas vêm sendo desenvolvidos recentemente e a maioria versa sobre amostragem destrutiva da biomassa e ajustes de modelos para sua estimativa. Em linhas gerais, as medições de carbono seguem o protocolo de amostragem direta (destrutiva, derrubada da vegetação) ou indireta. Esta última envolve a composição de equações com base nos dados da composição florística, mapeamento da vegetação e extrapolação da amostragem para a tipologia da vegetação (CERQUEIRA & FRANCA ROCHA, 2007). Não apenas dessa forma, mas também com a utilização de instrumentos sofisticados que tem sua abrangência limitada e custo elevado. Além desses, as técnicas de sensoriamento remoto possibilitam a obtenção da quantidade de carbono em áreas de grande dimensão, como mecanismo de monitoramento ambiental, de forma eficiente, abrangente e prática, e estes, são sem dúvidas, motivos que justificam o uso dessa técnica para tal finalidade.

Desta forma, o objetivo geral deste trabalho é:

- Estimar a variação interanual da quantidade de carbono armazenada pela Caatinga em Floresta-PE, integrando dados do sensor TM do satélite Landsat 5 e meteorológicos entre os anos de 1985 e 2009.

Os objetivos específicos são:

- i) Verificar a correlação entre o NDVI e a Produtividade Primária Bruta estimada com imagens dos satélites Landsat 5 (sensor TM);
- ii) Averiguar a variação do NDVI durante o ano de 2009 através de imagens do sensor MODIS e verificar sua resposta à precipitação;
- iii) Verificar a variação da GPP nas áreas de caatinga classificadas como preservada, moderadamente degradada e degradada;

- iv) Verificar a relação entre a GPP estimada por imagens do sensor TM e MODIS com a GPP obtida pelo produto MOD17A2.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Caatinga**

O bioma Caatinga é um aglomerado de arbustos espinhosos e florestas sazonalmente secas que ocupa uma área de cerca de 750.000 km<sup>2</sup> sob as latitudes subequatoriais compreendidas entre 2°45' e 17°21' S, situado quase que totalmente na região Nordeste do Brasil, que engloba parte do território dos estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Paraíba, Alagoas, Sergipe, Bahia e parte do Sul de Minas Gerais. Com área correspondente a 54% da Região Nordeste e a 11% do território brasileiro e constitui o chamado Polígono das Secas (LEAL et al., 2005; ALVES et al., 2009). Nesta região semiárida brasileira a vegetação está condicionada ao déficit hídrico relacionado à seca, em decorrência da irregularidade das chuvas e baixo índice pluviométrico, em média de 500 a 800 mm anuais. Analisando-se este fator, percebe-se que não é apenas a precipitação que provoca o déficit hídrico, mas também a associação a outros fatores característicos da região, como altas temperaturas associadas à alta intensidade luminosa, que provocam uma demanda evaporativa alta e consequente dessecação do solo (TROVÃO et al., 2007).

As plantas presentes nessa região são adaptadas a ambiente de aridez, com altas temperaturas diurnas, baixas temperaturas noturnas, alta radiação e baixo teor de água no solo. Talvez a principal e fundamental adaptação seja o mecanismo pelo qual essas plantas fixam o carbono atmosférico. A fixação de CO<sub>2</sub> nessas plantas ocorre, predominantemente, por um mecanismo conhecido como CAM (mecanismo ácido das crassuláceas). Essas plantas geralmente abrem seus estômatos durante a noite e os fecham durante o dia. Dessa forma, minimizam a perda de água e apresentam, portanto, alta eficiência no uso da água, porém em condições de abundância de água no solo, os estômatos dessas plantas ficam abertos durante o dia (CASTRO et al., 2005).

Mesmo a Caatinga sendo o único bioma exclusivamente brasileiro, tem o menor número e a menor extensão protegida dentre os biomas presentes no Brasil. E mesmo assim, as unidades de conservação falham em proteger toda a biodiversidade da Caatinga. Como se não bastasse, esse bioma vem sendo historicamente devastado para ceder lugar a atividades agropecuárias que ocupam vastas extensões do semiárido brasileiro. Uma vez abandonada a exploração dessas áreas, tem início o processo de sucessão ecológica, quase sempre interrompida por novas intervenções; assim, a

vegetação da caatinga apresenta-se como um mosaico formado por espécies em vários estágios no processo de sucessão ecológica (LEAL et al., 2005; ANDRADE et al., 2007).

Calixto Junior & Drumont (2011) verificaram quão frágil é o bioma Caatinga e que o seu processo de regeneração natural é bastante lento; assim como Costa et al. (2009) constataram que para as áreas em um estado avançado de degradação, mesmo abandonadas após uso agrícola, são constatados processos de desertificação, com grande dificuldade de regeneração de espécies, evidenciando a fragilidade desse bioma à maioria das ações antrópicas. Por outro lado, Lira et al. (2012) apontam que é possível, quando manejada corretamente, usar recursos da Caatinga sem causar danos severos a esse bioma. Esses autores ainda afirmam que se bem manejada, haverá de forma sistemática um incremento significativo nos parâmetros relacionados à fertilidade do solo e que o manejo sustentável da Caatinga reduz a devastação da vegetação do semiárido, favorecendo uma agricultura de base ecológica norteada por princípios sistemáticos da agroecologia.

Em decorrência da relevância que representa para o meio ambiente, o bioma Caatinga precisa ser preservado e estudado. Em especial, deve-se focar em mecanismos que proporcionem seu uso sustentável, tais como, manejo adequado na extração de madeira, integração lavoura pecuária floresta e adequação a legislação florestal em vigor. É tido como um ecossistema rico em variedades de fauna e flora como também apresenta muitas espécies endêmicas de animais e plantas que vivem no semiárido e se adaptaram de uma forma surpreendente ao clima seco desse geoambiente. Contudo, as atividades antrópicas, em especial a pecuária extensiva, contribuíram para alterações estruturais da Caatinga e estas se refletem em seu polimorfismo, mas não são os únicos fatores. Condições climáticas locais, aliadas a fatores ecológicos como solos, fenômenos da exposição e de abrigo, características herdadas de sistemas morfoclimáticos e paleoecológicos devem ser consideradas (ALVES et al., 2009).

Segundo relatório do MMA (Ministério do Meio Ambiente) sobre o monitoramento da Caatinga, em aproximadamente seis anos, entre 2002 e 2008, esse bioma perdeu aproximadamente 17.000 km<sup>2</sup> de sua área. Nesse sentido, em termos percentuais, a Caatinga teve sua cobertura vegetal original e secundária reduzida em 5% no período analisado. Só no estado de Pernambuco foram mais de 325 km<sup>2</sup> perdidos nesse mesmo período, o que configura uma área remanescente de apenas 45,4% de sua vegetação natural. Destaca-se, como resultado consequente, a área dos remanescentes

de vegetação da Caatinga que em 2002, com o refinamento da escala e da área mínima de detecção, era de 55,67% e em 2008, observa-se uma diminuição para 53,62%.

Silva et al. (2002) classificaram algumas áreas de caatinga como sendo prioritárias para conservação da biodiversidade. Dentre elas, estabeleceram que o município de Floresta - PE apresenta áreas de extrema importância biológica.

Porém, promover a conservação da biodiversidade da Caatinga não é uma ação simples, uma vez que grandes obstáculos precisam ser superados. O primeiro deles é a falta de um sistema regional eficiente de áreas protegidas, visto que nenhum outro bioma brasileiro possui tão poucas Unidades de Conservação de Proteção Integral. Não há dúvida que a Caatinga é um dos biomas brasileiros mais alterados pelas atividades humanas. É nesta região, por exemplo, que estão localizadas as maiores áreas brasileiras que passam hoje por processo de desertificação (SILVA et al., 2002).

Mas a importância da Caatinga não se limita à sua biodiversidade e endemismos. Como uma região árida altamente imprevisível e cercada de biomas tropicais, a Caatinga possui uma anomalia climática e funciona como um importante laboratório para estudos de plantas, invertebrados e vertebrados que se adaptam a um regime de chuvas altamente variável e estressante (LEAL et al., 2005).

Alguns estudos envolvendo o sensoriamento remoto como ferramenta que auxilia o monitoramento da Caatinga vêm sendo realizados, como é o caso de Silva et al. (2009) e Cunha et al. (2012) que estudaram a dinâmica da vegetação desse bioma através do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada). Além do NDVI outros parâmetros poderão ser analisados neste sentido. O albedo, o saldo radiativo, o fluxo de calor do solo e a GPP (Produtividade Primária Bruta, sigla em inglês) são parâmetros que podem também ser estimados por imagens orbitais e podem ser utilizado como indicativos da variabilidade espaço temporal da qualidade ambiental.

## **2.2 Sensoriamento Remoto**

Sensoriamento Remoto é entendido como o conjunto de atividades que permite a obtenção de informações de objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os mesmos, e é baseado na energia eletromagnética refletida e/ou emitida pelos objetos terrestres podendo assim avaliar algumas de suas

principais características. Logo, os sensores remotos são ferramentas indispensáveis para a realização de inventários, de mapeamento e de monitoramento de recursos naturais (MORAIS, 2002).

Estima-se que nos últimos anos existam mais de 5000 satélites orbitando a Terra, nas categorias militar, científico, de comunicação, meteorológico e os de recursos naturais. No Brasil, o uso do Sensoriamento Remoto utilizando dados coletados por satélites de recursos naturais, iniciou em 1972 com o lançamento do Earth 1, mais tarde denominado Landsat (MOREIRA, 2011).

Analisando o uso dos sensores orbitais, é notório o crescimento da utilização dessas ferramentas, juntamente com técnicas de geoprocessamento nas diversas áreas, envolvendo a determinação de parâmetros que viabilizam o monitoramento de recursos ambientais (SILVA et al. 2009). Assim, os sensores, atualmente disponíveis apresentam características capazes de fornecer parâmetros precisos e possibilitam monitorar continuamente e eficientemente os recursos florestais (NORA & MARTINI, 2010). Como demonstra estudo realizado por Dantas et al. (2010), os quais obtiveram correlações significativas entre Albedo estimado pelo sensor TM (*Mapper Tematic - Mapeador Temática*) e AVHRR (*Advance Very High Resolution Radiometer - Radiômetro Avançado de Alta Resolução*) e albedo medido por instrumento.

Os diversos sensores orbitais atualmente disponíveis podem possuir diferentes tipos de resolução, seja radiométrica, espacial, temporal ou espectral, sem de fato divergir tanto quanto às aplicações e uso, porém sendo mais ou menos empregados para determinada finalidade de acordo com as suas características. O importante é fazer estudos que permitam apontar sob o ponto de vista de ser mais ou menos eficiente para determinado fim, entre os diversos produtos de vários sensores existentes, o que mais se adequa para tal finalidade.

Estudos realizados, como o por Barbosa et al. (2006) que analisaram a variação do NDVI durante 20 anos para todo o Nordeste Brasileiro (NEB), através do AVHRR acoplado a plataforma NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration - Administração Oceânica e Atmosférica Nacional*), assinalando através dos resultados que os padrões de variabilidade NEB vegetação foram resultado do impacto da aridez de maior ocorrência durante a última década do século XX, ainda enfatizam a viabilidade da utilização de técnicas de sensoriamento remoto no monitoramento de grandes áreas, e que sem os usos desses recursos orbitais seria extremamente difícil e oneroso tais práticas. Assim, o sensoriamento remoto ocupa espaço ímpar nesse cenário,

ao possibilitar um amplo aparato de atuação no que diz respeito ao monitoramento ambiental (MASCARENHAS et al., 2009).

Propastin et al. (2007) utilizaram um sistema de monitoramento baseado no uso de dados de Sensoriamento Remoto para estimativa do balanço de carbono em zonas áridas do Cazaquistão. Este sistema levou em consideração os dados orbitais a partir da combinação de radiação solar global, IAF (Índice de Área Foliar) e NDVI obtidos do satélite SPOT (*System for Earth Observation* – Sistema de Observação da Terra). Os autores atestaram a eficiência dessa técnica na determinação do carbono e, assim, o modelo foi utilizado para quantificar estoque e fluxo de CO<sub>2</sub> em todo território do Cazaquistão.

### **2.2.1 Produtos do Sensor MODIS**

O sensor MODIS (*Moderate Resolucion Imaging Spectroradiometer* - Espectrorradiômetro de Imagens de Resolução Moderada) é o principal instrumento das plataformas orbitais Terra e Aqua, ambos lançado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration* - Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço). Ele foi projetado para fornecer uma série de observações globais da superfície terrestre, oceano e atmosfera nas regiões do infravermelho e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, além da região do visível, realizando uma cobertura na Terra a cada dois dias. Este instrumento possui alta sensibilidade radiométrica (12 bits) em 36 bandas espectrais contidas no intervalo de 0,4 a 14,4 µm do espectro eletromagnético. Duas dessas bandas são adquiridas na resolução espacial de 250 m, outras cinco com 500 m e as demais com 1 km, resultando em uma faixa imageada de 2330 km com cobertura global. Existem variados produtos que podem ser diários ou uma composição de oito ou 16 dias. Nestes casos são selecionados os melhores pixels das oito ou 16 imagens diárias geradas, com o que se forma uma imagem composta (SOARES et al., 2007).

Trabalhos realizados envolvendo uso de sensor MODIS para avaliação da dinâmica da vegetação vêm sendo cada vez mais usados, como o desenvolvido por Anderson et al. (2003) pelo qual afirmaram que em virtude de possuírem alta resolução temporal, apesar de moderada resolução espacial, é dotado de uma grande capacidade para estudos de dinâmicas ecológicas tanto terrestres quanto oceânicas.

Nara & Martini (2010) estudaram dois fragmentos de Mata Atlântica, para caracterizar a dinâmica sazonal, através do produto MODIS de composição de 16 dias de índice de vegetação. Na ocasião, os autores verificaram que o EVI (*Enhanced Vegetation Index* - Índice de Vegetação Melhorado) apresentou-se mais sensíveis a variações anuais da vegetação em relação ao NDVI, demonstrando ser mais eficiente. Ainda assim, obtiveram correlações positivas entre o perfil desses índices com as variações de temperaturas. Desta forma, enfatizam, com base nos dados obtidos, o grande potencial do sensor MODIS para o monitoramento contínuo das formações florestais.

### 2.2.2 Sensor TM

O sensor TM (*Thematic Mapper* - Mapeador Temático) foi lançado a partir de 1984 pela NASA, sendo acoplado ao Satélite Landsat. Este sensor opera em sete bandas espectrais todas com resolução espacial de 30m, exceto a banda 6, a do infravermelho termal, que possui 120 m de resolução.

O uso do TM para diversos fins vem sendo cada vez mais empregado, apesar de sua resolução temporal de 16 dias que dificulta o manejo de área onde há uma pretensão de observação com mais frequência. Por outro lado, sua resolução espacial de 30m é um fator que proporciona uma boa vantagem principalmente quando se trabalha com dados que requerem mais precisão, mesmo assim, o uso desse sensor vem sendo empregado com frequência para parametrizar fatores que exercem influência sobre a qualidade ambiental. É o caso do trabalho realizado por Silva et al. (2009) que verificaram o processo de desertificação ocorrido no município de Floresta-PE, por meio de imagens TM, em três datas distintas. Na ocasião, os autores verificaram que o albedo aumentou e o NDVI diminuiu no local de estudo, fato atribuído à supressão da vegetação nativa, que caracteriza, segundo os autores, o início do processo de desertificação.

Cunha et al. (2012), através de estudo comparativo, em uma mesma área, com intervalo de 23 anos em uma bacia hidrográfica no estado da Paraíba, através do sensor TM do satélite Landsat 5, verificaram um acentuado acréscimo no vigor da vegetação nesta área, fato que atribuíram ao êxodo rural ocorrido no período estudado, porém observaram que nas áreas com maiores altitudes houve um incremento no vigor da vegetação. Também verificaram que o albedo da superfície foi o parâmetro que melhor se correlacionou com as variações da biomassa vegetal. Da mesma forma asseguram a

eficiência deste sensor em análise e determinação de parâmetros que mensuram a qualidade ambiental. Em razão, acredita-se, da resolução espacial média que possui (30 m).

Em estudo similar, Aquino et al. (2012) averiguaram a dinâmica da vegetação em uma área no município de São Raimundo Nonato no estado do Piauí utilizando imagens TM, verificando um acentuado decréscimo da vegetação em um intervalo de 20 anos, entre os anos de 1987 e 2007, enfatizando a necessidade de intensificar a proteção e ratificando a eficiência da técnica para monitorar grandes áreas que de vegetação.

### **2.3 Índices de vegetação**

O conhecimento da dinâmica temporal da vegetação revela padrões, processos e mecanismos, os quais podem ser usados para fazer previsões e orientar estratégias de proteção e conservação dos recursos florestais. Os métodos propostos para este tipo de abordagem se diversificam tanto no procedimento técnico empregado como na área de concentração. Entretanto, a velocidade de supressão dos remanescentes florestais em decorrência do desenvolvimento econômico exige a utilização de métodos capazes de produzir diagnósticos precisos a respeito dos recursos florestais e de subsidiar planos imediatos de conservação (NORA & MARTINI, 2010). Neste contexto, o monitoramento dos recursos naturais em regiões extensas e de difícil acesso pode ser otimizado por meio do emprego do Sensoriamento Remoto. Esses métodos incluem o processamento de imagens digitais, visando às estimativas qualitativas e quantitativas de alterações ocasionadas por fatores naturais e/ou antrópicos.

Um elemento fundamental na detecção de mudanças na cobertura vegetal, a partir de imagens orbitais, consiste em distingui-las de modificações derivadas de mudanças atmosféricas que podem estar influenciando a imagem em uma ou outra situação e não em ambas. As alterações na cobertura vegetal do solo podem ser detectadas através de imagens de índice de vegetação geradas pelas combinações de duas ou mais faixas espectrais capazes de realçar as propriedades da vegetação (SHIMABUKURO et al., 1998; NORA & MARTINI, 2010). Assim, os índices de vegetação são também importantes indicadores da qualidade ambiental, além de serem bastante utilizados nos estudos sobre o meio ambiente (DEMARCHI et al., 2011).

Dentre os vários índices de vegetação existente o NDVI mostra-se como um parâmetro satisfatório para análise da dinâmica da vegetação, sendo fundamentado no comportamento antagônico da reflectância da vegetação nas regiões espectrais do vermelho e infravermelho próximo. Em princípio, quanto maior for a densidade da cobertura vegetal, menor será a reflectância na região do vermelho devido à maior oferta de pigmentos fotossintetizantes. Por outro lado, maior será a reflectância verificada na região do infravermelho próximo devido ao espalhamento múltiplo da radiação eletromagnética nas diferentes camadas de folhas. O NDVI consegue realçar a diferença do comportamento espectral dos alvos nestas regiões do espectro eletromagnético. Uma limitação relevante deste índice é que quando utilizado em vegetação de alta biomassa, como exemplo as florestas tropicais úmidas e florestas antigas, tende a saturação em razão de sua escala de variação ser pequena, entre -1 e +1 (DONG et al., 2003; ROUSE et al., 1973; PONZONI & SHIMABUKURO, 2007; NORA & MARTINI, 2010). Mesmo assim, o índice mostra-se com uma correlação razoável com o vigor de vegetação e também como outros importantes parâmetros ecológicos, tais como índice de área foliar (IAF) e fração da radiação fotossinteticamente ativa, e assim, continua a ser um indicador normalmente usado de parâmetros da vegetação em dados de sensoriamento remoto (ELMORE et al., 2000, ANYAMBA & TUCKER, 2005).

O NDVI é uma combinação aritmética que destaca os contrastes nos padrões de resposta espectral da vegetação nas regiões do vermelho e do infravermelho próximo (ZERDA & TIEDEMANN, 2010) e é um parâmetro bem sucedido para medida da densidade da vegetação em que ele é suficientemente estável para permitir comparações significativas das mudanças sazonais e interanual de crescimento da vegetação ativa (HUETE et al., 2002) e também é considerado uma boa variável capaz de fomentar modelos que estimam a biomassa e, como consequência, pode ser relacionado ao estoque de carbono nas plantas (COLTRI et al., 2009), como mostra trabalho realizado por Hooda & Dye (1996). Além desse, vários trabalhos relacionam a biomassa da vegetação obtida através deste índice com a produtividade agrícola (ROSA et al., 2010; PICOLLI et al., 2009) e em análise do comportamento espacial e temporal da vegetação em diferentes biomas (SILVA et al., 2009; CUNHA et al., 2012; LIRA et al., 2011).

Bolfe et al. (2012) avaliaram a correlação entre variáveis espectrais e o estoque de carbono da biomassa, obtidos através de equações alométricas, em área com sistema agroflorestais em diferentes estágios de desenvolvimento, obtendo as melhores

correlações com Índice de Vegetação de razão simples e NDVI para florestas mais jovens, portanto menos densa, porém semelhantes em densidade, à vegetação típica de Caatinga.

## 2.4 Produtividade Primária Bruta (GPP)

A GPP (*Gross Primary Production* - Produtividade Primária Bruta) é um parâmetro que está diretamente relacionado com a quantidade da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela vegetação e também tem relação direta com o índice de vegetação e é definida como sendo o total de carbono produzido pela vegetação, incluindo o gasto pelo processo de respiração (GITELSON et al., 2008).

Um dos problemas principais na estimativa da GPP é encontrar valores representativos da eficiência de conversão ( $\epsilon$ ) de PAR (*Photosynthetically Active Radiation* - Radiação Fotossinteticamente Ativa) para vários tipos de vegetação, uma vez que essa eficiência muda com o tipo de vegetação, estado fenológico, temperatura, disponibilidade de água e tipo de metabolismo da planta, C3 ou C4 (HOODA & DYE 1996). Ter conhecimento da eficiência máxima com que cada tipo de vegetação aproveita a PAR é fundamental para estimativa da GPP, uma vez que esta varia consideravelmente a depender dos fatores acima citado e também nos diferentes biomas. Existem, para alguns ambientes, valores de  $\epsilon$  máximo determinados por alguns autores como Ibrahim (2006),  $1,8 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para ambientes tropicais, Ochi & Shibasaki (1999); As-syakur et al. (2010),  $1,5 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  em locais da região Asiática, Silva et al. (2012),  $2,15 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para área com fruticultura irrigada.

Estimativas da GPP em ambientes arborizados e agrícolas, por meio de sensores orbitais, estão cada vez mais avançando com o objetivo de pesquisar mudanças no clima da Terra, buscando modelo global que possa ser aplicado em vários biomas e tipo de vegetação (HILKER et al., 2008). Neste sentido, Van Tuyl et al. (2005) estimaram a quantidade de carbono em um ambiente semiárido nos Estados Unidos utilizando dados orbitais.

Silva et al. (2013) determinaram a Produtividade Primária Bruta por meio de imagens TM em uma perímetro irrigado localizado em São Gonçalo no estado da Paraíba, e compararam os resultados com os obtidos através do produto MOD17A2, que fornece dados de GPP em uma composição de 8 dias com 1 km de resolução espacial. Os autores verificaram pouca diferença entre a GPP estimada e os valores oriundos do

produto MOD17A2, o que não houve entre a área irrigada e não irrigada da cena de estudo.

Gitelson et al. (2008) verificaram a precisão de uma técnica de estimativa da GPP, via sensoriamento remoto, para uma área cultivada com milho nos campos da Universidade de Nebraska-USA. Esses autores encontraram uma boa relação entre a Produtividade Primária Bruta estimada por Sensoriamento Remoto e a medida através da covariância de vórtices turbulentos.

Liu et al. (2011) verificaram a eficiência de dois algoritmos para estimar a GPP em local semiárido da China em área de pastagem. Um deles baseado no produto MOD17A2, que se fundamenta no conceito de eficiência ( $\epsilon$ ) de conversão da radiação fotossinteticamente ativa (PAR). Outro é o modelo de fotossíntese da radiação (VPM) desenvolvido por Xiao et al. 2004, que usa o Índice de Vegetação Melhorada (EVI) como substituta da Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa (FAPAR). O controle foi verificado através do método da covariância de vórtices turbulentos (CE). Os resultados mostraram alta correlação entre os dois algoritmos, porém os valores baseados no VPM foram mais consistentes com os verificados com o do CE para aquelas condições ambientais.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

A pesquisa foi realizada no município de Floresta, ( $8^{\circ}36'05''\text{S}$  e  $38^{\circ}34'02''\text{O}$ ), no estado de Pernambuco no semiárido nordestino, situado na Mesorregião do São Francisco Pernambucano, a 330 km da capital do Estado, Recife (Figura 1). Com altitude que varia de 300 a 1050 m e área de 3.675 km<sup>2</sup>, o município tem como principais atividades econômicas a pecuária e a agricultura de sequeiro, e em alguns casos, a agricultura irrigada.

A classificação da região, segundo Köppen é BSw'h' tida como clima muito quente, semiárido, tipo estepe. Predomina na região cobertura vegetal com caatinga hiperxerófila, de modo geral, pouco densa e arbustiva (ARAÚJO FILHO et al., 2001).

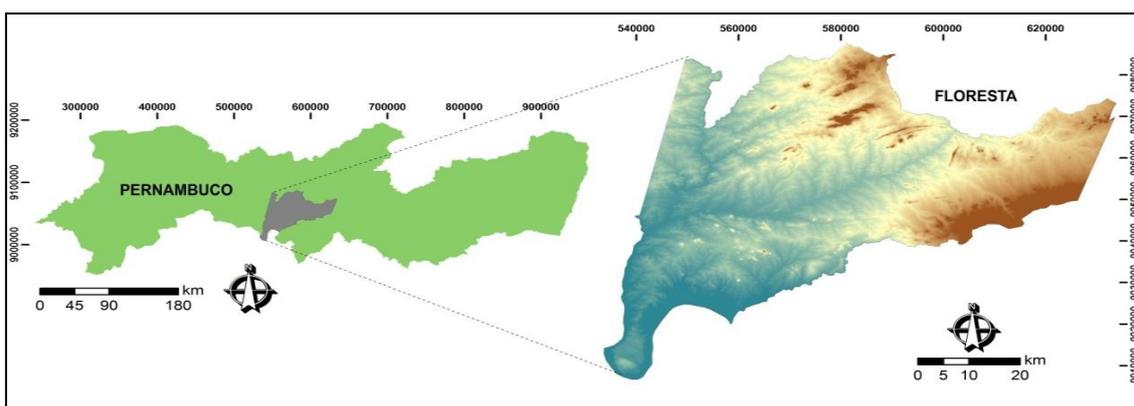


Figura 1. Mapa da localização e elevação do Município de Floresta-PE

#### 3.2 Dados orbitais

##### 3.2.1 Imagens Landsat 5

As imagens do sensor TM (*Thematic Mapper*) do Landsat 5 da área de estudo possui órbita 266 e ponto 16 e foram adquiridas junto ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) através do site: [www.inpe.br](http://www.inpe.br). Foram selecionadas duas imagens: 18 de novembro de 1985 e 20 de novembro de 2009, para averiguar se houve variação do NDVI e da GPP na área de estudo neste intervalo de tempo. Ainda em 2009 foi verificada a diferença da GPP nas áreas classificadas, segundo Galindo (2007), em caatinga conservada, degradada e moderadamente degradada, os critérios seguidos pela

autora para essa classificação envolve aspecto de solo como ocorrência de erosão, taxa de recobrimento, encrostamento dentre outros. Além de aspecto da vegetação como permeabilidade na caatinga, altura da vegetação e ocorrência de espécies indicadoras. Algumas informações das imagens TM consta na Tabela 1.

**Tabela 1. Informações Imagens TM**

Data	Elevação solar	Azimute do Sol	Hora da passagem do satélite	Resolução Espacial
18/11/1985	57,4185 °	112,195 °	9h:10min:18s	30 m
20/11/2009	62,1423 °	116,096 °	9h:32min:13s	30 m

### 3.2.2 Produtos MODIS

As imagens dos produtos MOD09GA e MOD11A1 foram adquiridas ao USGS (United States Geological Survey – Pesquisa Geológica dos Estados Unidos) através do site [www.glovis.usgs.gov](http://www.glovis.usgs.gov).

O produto MOD09GA fornece dados reflectância terrestre em uma resolução espacial de 500 metros em uma grade diária, além de imagem do ângulo zenital com 1km de resolução. Para estimar o saldo da radiação ( $R_n - W \cdot m^{-2}$ ) é necessários dispor de dado de emissividade, este não encontrados no produto MOD09GA, para isso um produto complementar -MOD11A1- é necessário para estimar o  $R_n$  e assim estimar fração evaporativa através dos qual se obtém a eficiência de uso da luz. Os valores de NDVI e GPP para o dia 21 de novembro de 2009, gerados a partir do produto MOD09GA foram comparados com os da imagem TM do dia 20 do mesmo mês e ano, após reamostragem da resolução espacial desta última para 500 metros e verificado a correlação entre a GPP estimados através do produto do sensor MODIS e do TM.

Além destes descrito acima, para validação dos dados de GPP, foi adquirido o produto MOD17A2 do dia 25 de novembro de 2009. Este fornece dados de GPP ( $kgC \cdot m^{-2}$ ) com base no conceito da eficiência na utilização de radiação que é potencialmente utilizado como entradas para os modelos de dados para calcular, além da GPP, a energia terrestre, os processos do ciclo da água e biogeoquímica da vegetação. Este produto é um acumulado de oito dias com 1 km de resolução espacial, neste caso, computando os oito dias anteriores ao dia 25 de novembro de 2009.

### 3.3 Dados meteorológicos

As regiões de clima semiárido apresentam vegetação mais susceptível a mudanças no que diz respeito à precipitação, por isso é importante, quando se estuda comportamento da vegetação, a obtenção de dados pluviométricos para verificar se as possíveis mudanças da vegetação são ocasionadas pela ação de degradação da vegetação ou apenas escassez de chuva na área de estudo.

Os dados de precipitação e radiação solar global para 2009 foram adquiridos no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, <http://www.inmet.gov.br>) no mês e no dia coincidente com a geração da imagem. Já os de 1985, foram provenientes da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE). Ainda para este ano, como não dispunha de dados de velocidade do vento, umidade relativa e temperatura do ar para Floresta-PE, conveniou-se adquirir esses da cidade mais próxima, no caso, Cabrobó-PE.

### 3.4 Estimativa da Produtividade Primária Bruta

#### 3.4.1 GPP por Imagens TM

Todo o processamento de imagens foi efetuado através da ferramenta *Model Maker* do Software Erdas na versão 9.1, seguindo o fluxograma abaixo:

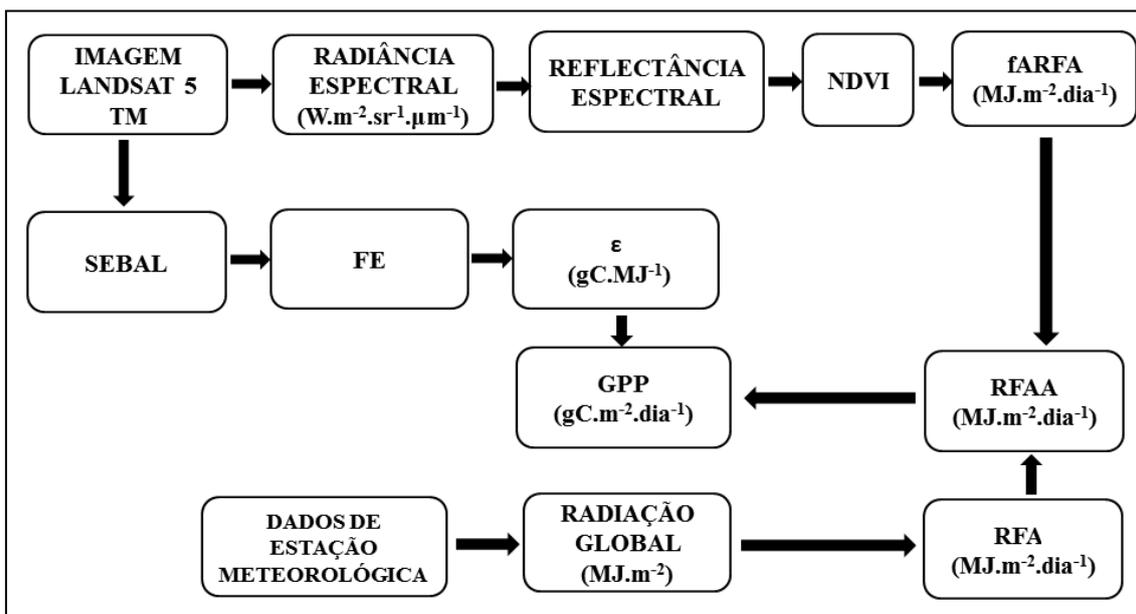


Figura 2. Fluxograma do processo para obtenção da GPP por imagem TM

### 3.4.1.1 Radiância espectral

Foi realizado um pré-processamento das imagens envolvendo o registro, correção atmosférica utilizando o método da subtração dos objetos escuros (CHAVEZ JR., 1996; GÜRTLER et al., 2005), empilhamento das 7 camadas do sensor TM e o recorte da área de interesse. O registro foi realizado em razão das constantes alterações ocorridas no ângulo formado entre o satélite e a superfície terrestre. Após esses procedimentos, procedeu-se o cômputo da radiância espectral  $L_{\lambda_i}$  em ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ) que converte números digitais em radiância espectral de cada pixel de acordo com a equação proposta por Markham e Baker (1987):

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

Neste caso,  $a_i$  e  $b_i$  são radiâncias espectrais mínimas e máximas de cada banda e ND número digital de cada pixel.

### 3.4.1.2 Reflectância espectral

A reflectância monocromática de cada banda é a parte da energia que é refletida em razão da que chega a superfície que é obtido segundo a equação (ALLEN et al. 2002; SILVA et al. 2005).

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

em que  $k_{\lambda_i}$  é irradiância solar espectral de cada banda,  $L_{\lambda_i}$  é radiância espectral de cada banda,  $d_r$  é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol e  $Z$  é o ângulo zenital solar obtido na hora da passagem do satélite. Os detalhes de obtenção de  $k_{\lambda_i}$  podem ser obtidos em Allen et al., (2002) e  $d_r$  em Iqbal (1983).

### 3.4.1.3 NDVI

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada é obtido pela razão entre a diferença das reflectâncias da região espectral do vermelho ( $\rho_{IV}$ ) e do infravermelho próximo ( $\rho_V$ ) pela soma das mesmas:

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

### 3.4.1.4 fARFA

A fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (fARFA) expressa a quantidade da radiação solar que age diretamente no estímulo ao processo fotossintético em determinado intervalo de tempo (MOREIRA, 2011), e tem relação direta com o NDVI, sendo expressa pela equação de Hooda & Dye (1996):

$$fARFA = -0,31 + 1,31 \times NDVI \quad (4)$$

### 3.4.1.5 Radiação solar global

Para a imagem de 1985, como não existiam dados de radiação solar global, adotou a metodologia de Ångström-Prèscott, para estimativa desta variável:

$$R_G = R_0 \times \left( a + b \frac{n}{N} \right) \quad (5)$$

onde  $R_G$  é a radiação solar global ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ )  $R_0$  é a radiação solar no topo da atmosfera ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ); a e b são coeficientes lineares, n é a insolação real (h), que de acordo com dados climatológicos, a média para Floresta é 9,47 h/dia, (RAMOS et al., 2009); N é o fotoperíodo, obtido pela equação:

$$N = \frac{2 \times (\text{arc Cos}(-\text{tg } \phi \text{ tg } \delta))}{15} \quad (6)$$

em que  $\delta$  é a declinação do sol, que segundo Klein (1977) foi obtida pela equação:

$$\delta = 23,45 \times \text{Sen} \left( \frac{360}{365} (284 + D) \right) \quad (\text{graus}) \quad (7)$$

Em que D é o dia sequencial de ano.

#### **3.4.1.6 RFA**

A Radiação Fotossinteticamente Ativa, que corresponde à fração da radiação solar, situada entre 400 nm e 700 nm, e na ausência de medições da mesma, pode ser estimada em função da radiação solar global diária, segundo a equação proposta por Bastiaanssen & Ali (2003), qual seja:

$$\text{RFA} = 0,48 \times R_G \quad (\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}) \quad (8)$$

#### **3.4.1.7 RFAA**

A Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida é obtida em função da fração e da RFAI, de acordo com:

$$\text{RFAA} = f\text{RFAA} \times \text{RFAI} \quad (\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}) \quad (9)$$

#### **3.4.1.8 Eficiência do uso da luz**

O fator de eficiência do uso da luz ( $\epsilon$ ) é a razão entre a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida -RFAA- pela vegetação e a quantidade de carbono produzido em função da fotossíntese realizada pela planta através desse tipo de radiação, é um fator de conversão da RFAA em carbono armazenado pela vegetação. Segundo Turner et al., (2009) pode assumir valores de acordo com o NDVI e é dada em

unidade de massa, g ou Kg, de carbono para cada unidade de energia da Radiação Fotossinteticamente Ativa absorvida pela vegetação (gC.MJ<sup>-1</sup>).

O fator de eficiência do uso da luz pode ser obtido de acordo com a equação proposta por Field et al. (1995) e posteriormente modificada por Bastiaanssen e Ali, (2003).

$$\varepsilon = \varepsilon' \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot FE \quad (10)$$

onde  $\varepsilon'$  é a eficiência máxima que segundo Ibrahim (2006) é de 1,8 (g C.MJ<sup>-1</sup>) para região situadas entre os trópicos,  $T_1$  e  $T_2$  são parâmetros relacionados à temperatura e tipificam o fator temperatura influenciando na eficiência fotossintética da vegetação, em que:

$$T_1 = 0,8 + 0,02 T_{opt} - 0,0005 T_{opt}^2 \quad (11)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \exp(0,2 T_{opt} - 10 - T_{dia})} \cdot \frac{1}{1 + \exp(0,3(-T_{opt} - 10 + T_{dia}))} \quad (12)$$

e  $T_{opt}$  é a temperatura média do ar (°C) do mês de máximo NDVI,  $T_{dia}$  é a temperatura média diária do dia (°C) para o qual está estimando a GPP. A FE é a fração evaporativa estimada pelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land* – Algoritmo de Balanço de Energia na Superfície da Terra), (Bastiaanssen et al., 1998; Silva & Bezerra, 2006). Pelo SEBAL estima-se a densidade do fluxo de calor latente LE (W.m<sup>-2</sup>) em função do balanço de energia:

$$LE = .Rn - G - H \quad (13)$$

onde Rn (W.m<sup>-2</sup>) é o saldo da radiação, G (W.m<sup>-2</sup>) é a densidade do fluxo de calor do solo e H (W.m<sup>-2</sup>) é densidade do fluxo de calor sensível, assim, a FE é dado por:

$$FE = \frac{LE}{(Rn - G)} \quad (14)$$

Por fim, a Produtividade Primária Bruta, em  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , foi obtida com base no modelo proposto por Monteith (1972) e Hilker et al. (2008).:

$$GPP = \varepsilon \sum RFAA \quad (15)$$

### 3.5 GPP por imagens MODIS

Todo processamento das imagens MODIS, seguiu a mesma metodologia usada na TM, excetuando o registro e o fato que o produto utilizado já fornece dados de reflectância e ângulo zenital (MOD09GA) e emissividade (MOD11A1). A Figura 3 mostra o fluxograma para obtenção da GPP com os produtos MODIS.

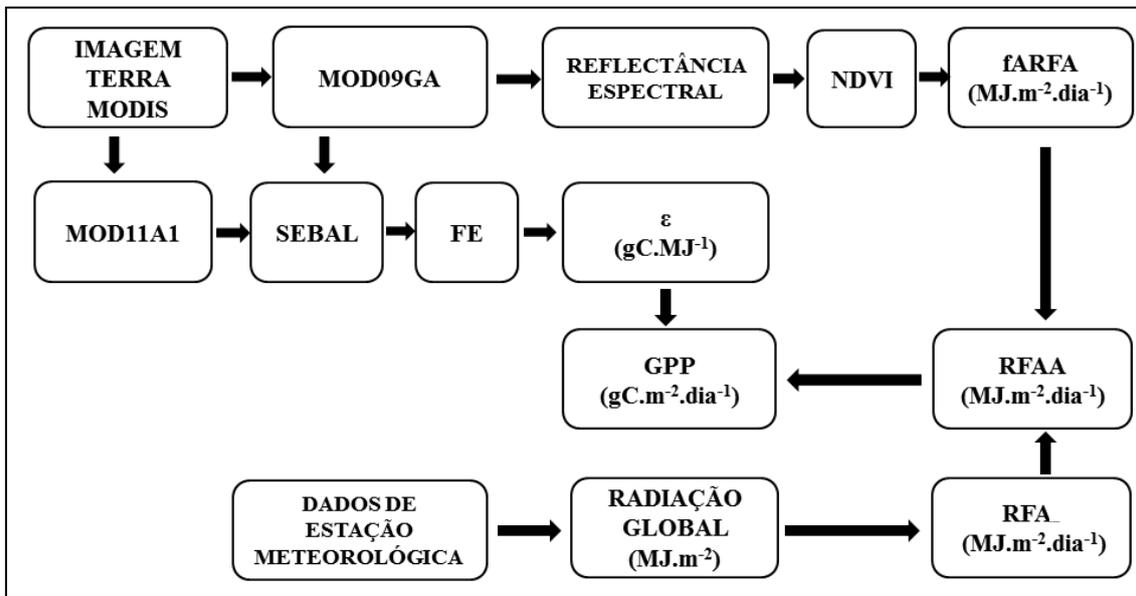


Figura 3. Fluxograma do processo para obtenção da GPP por imagem MODIS - produto MOD09GA

#### 4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise de comparação entre os valores de GPP e NDVI estimadas por imagem do sensor TM em 18 de novembro 1985 e 20 de novembro de 2009 foi observando o valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação. A comparação entre TM 2009 500 m e MOD09 2009 500 m foi realizada por meio do coeficiente de correlação selecionando os dados em uma mesma coordenada nas duas cenas, em um número de 30 pontos, além de histograma de frequência.

A distribuição anual do NDVI gerado por imagens MODIS -MOD13Q1- foi averiguada por gráficos de barra com intervalo de 16 dias, e assim verificada a distribuição do NDVI em função da precipitação registrada para o ano de 2009. Para Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) e do Erro Absoluto Médio (EAM) entre a GPP estimada por imagem TM e MO09GA, TM e MOD17A2 e entre MOD17A2 e MOD09GA foram utilizadas expressões:

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (O_i - P_i)^2} \quad (17)$$

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |O_i - P_i| \quad (18)$$

Em que:

Pi = valores estimados

O<sub>i</sub> = valores observados

N = número de dados

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Dados Pluviométricos

Pela Figura 4, pode-se verificar os valores de precipitação pluvial mensal para os anos de 1985 e 2009. Para o ano de 2009 o volume precipitado foi inferior ao ocorrido em 1985, 472,5 mm e 617,2 mm, respectivamente. A diminuição da chuva em 2009 está associada à ocorrência do fenômeno El Niño o que atuou inibindo a precipitação na região. Como em 1985 as condições meteorológicas não apresentaram alterações provocadas por qualquer fenômeno, era de se esperar um volume de chuva além do observado para 2009. Mesmo assim, em ambos os anos, considerando uma séria temporal de precipitação para determinação de anos chuvosos, normal e seco, como em Moura et al. (2010), os anos em estudos são considerados normais. O maior volume de precipitação pluvial ocorrido em 1985 não exerce maior influência, em relação a 2009, sobre a vegetação no momento de aquisição da imagem, uma vez que o período chuvoso ocorreu em momento distinto da época do imageamento da área de estudo.

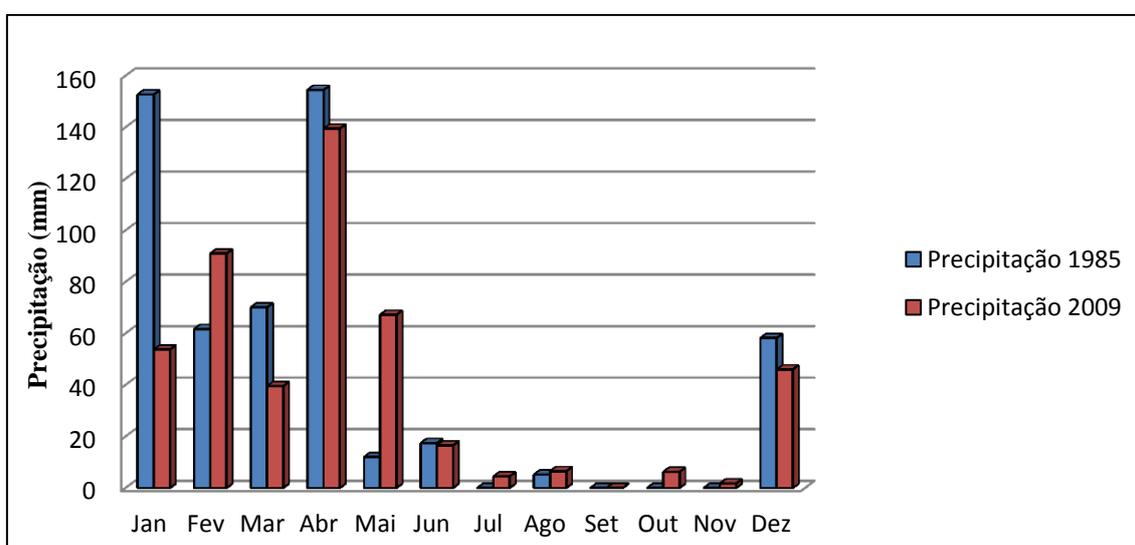


Figura 4 - Distribuição mensal da precipitação para Floresta-PE, em 1985 e 2009

### 5.2 Variação quinzenal do NDVI por imagens do produto MOD13Q1 para 2009

A variação do NDVI e da precipitação ao longo do ano é mostrada pela Figura 5. Observa-se que há uma relação entre esses parâmetros, pois à medida que há um incremento da precipitação a vegetação logo fornece uma resposta no quesito vigor

vegetativo, verificado através do NDVI que atingiu seus maiores valores justamente no período considerado chuvoso para a região onde foi realizado o estudo, semelhantemente como os trabalhos realizados por LIRA et al. (2011); ZERDA & TIEDEMANN (2010).

As perdas das folhas nesse tipo de vegetação ocorrem constantemente no período de estiagem, como mecanismo de sobrevivência da maioria das espécies que vivem nessa região para conseguirem atravessar o período seco. Assim, baixos valores de NDVI, para essa região, não necessariamente significa que houve uma supressão na vegetação, mas as perdas de folhas que por sua vez fazem com que os valores de NDVI sejam menores nessas áreas.

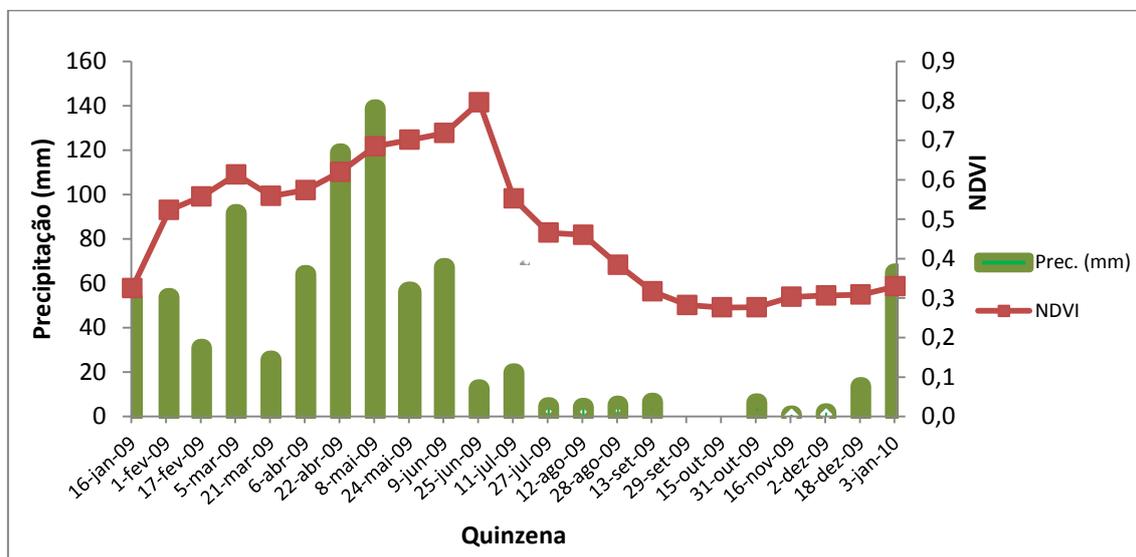


Figura 5 - Distribuição quinzenal da precipitação (prec.) e NDVI-produto MOD13Q1-para o município de Floresta-PE, em 2009

### 5.3 Relação entre NDVI MODIS - MOD09GA - e NDVI TM

A relação entre os NDVI's obtidos por imagens dos sensores MODIS e TM é mostrada na Figura 6. Embora em datas distintas os valores de ambos se mostraram bem correlacionados quando se observa o valor do coeficiente de correlação  $r=0,73$ . A significância da relação foi verificada pelo teste t, como  $t_{cal}=10,14$  foi maior que o  $t_{tab}=2,467$  a hipótese nula foi rejeitada, ou seja, a correlação foi significativa a 1% de probabilidade, a variação dos dados pode ser explicada em 53% pelo modelo linear. A estimativa do NDVI por imagem do sensor MODIS, mostra-se superestimando o por

imagem do sensor TM, isto acontece principalmente devido ao horário da geração da imagem do sensor MODIS ser uma hora a mais, recebendo maior influência pelo o ângulo zenital e conseqüentemente radiação solar.

Costa & Souza Jr. (2005) encontraram valores de coeficiente de correlação, quando comparando o NDVI obtido pelo produto MOD13Q1 com o do ETM+, acima de 95% para áreas maiores que 100 ha e para áreas menores que três ha, o valor de  $r$  não ultrapassou de 0,014. O valor que mais se aproximou do encontrado neste trabalho foi o para área entre 3 e 100 ha que obteve coeficiente de correlação de  $r=0,778$ . Da mesma forma, Carvalho Júnior et al. (2008) compararam os NDVI's obtidos dos sensores MODIS - MOD13Q1 - e ETM+ quanto a eficiência para avaliar o emprego de assinaturas temporais para detectar tipos de savanas e não encontraram diferenças relevantes nesta comparação.

Na Figura 7 são mostradas as duas imagens de NDVI, sendo uma gerada pelo sensor TM, no dia 20 de novembro de 2009 às 9h32 e a outra pelo MODIS, no dia 21 do mesmo mês às 10h30, ambos pelo horário solar. Embora nessas condições, além de diferenças em resolução espectral, radiométrica e espacial e ainda da forma como são geradas com algoritmos específicos, visualmente existem poucas diferenças entre as imagens, porém os valores de NDVI gerados pelo MODIS apresentaram ligeiramente maiores que os com TM. Essa diferença numérica se deve, possivelmente, além das diferenças acima citadas, a distinções entre as formas de correção atmosférica aplicada as imagens, as condições atmosféricas distintas entre as datas de geração das imagens e ao processo de reamostragem da imagem TM de 30 para 500 m de resolução espacial.

A média do NDVI para a imagem TM foi de 0,2455 e desvio padrão de 0,036. Na imagem MODIS a média foi de 0,3127 e desvio de 0,030. Silva et al. (2009) encontraram para a mesma área de estudo, com imagem TM, valores médios de NDVI de 0,373 e 0,261, em 19 de maio 1994 e em 06 do mesmo mês de 2001, respectivamente. Os autores atribuem essa diferença ao fato dessas imagens ter sido geradas no período chuvoso da região que vai de dezembro a março, favorecendo o aumento de vigor da vegetação neste local, o que não ocorreu neste trabalho, verificando uma precipitação de 6 mm para a data 20 de novembro de 2009. De forma semelhante, Lira et al. (2011) encontraram valores de NDVI para caatinga na ordem de 0,330, classificando como sendo área de alto adensamento da vegetação combinado com um baixo percentual de solo exposto.

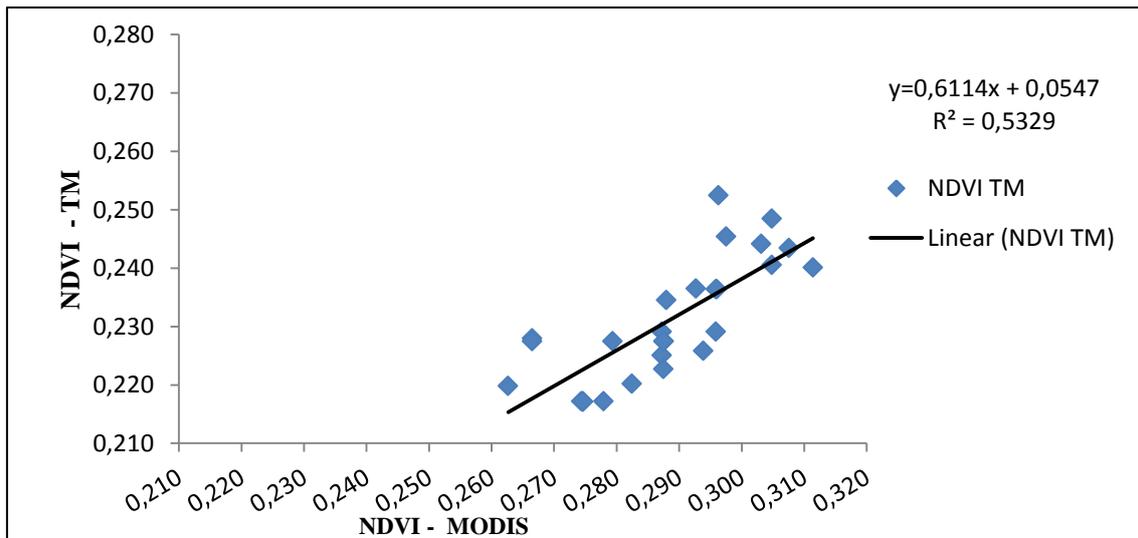


Figura 6 – Diagrama de dispersão entre NDVI's gerados por imagem do produto MOD09GA e do sensor TM, para o mesmo local, nas datas de 21 de novembro de 2009 para MODIS e 20 de novembro de 2009 para o TM

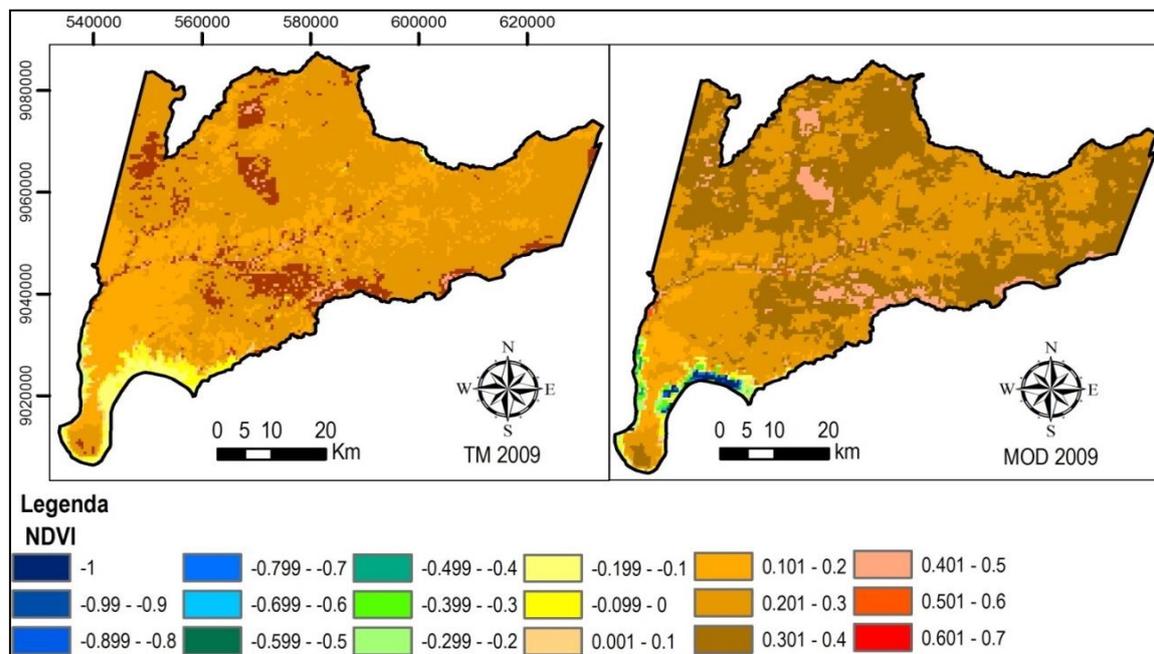


Figura 7 - Mapa do NDVI gerado por imagem do produto MOD09GA em 21 de novembro de 2009 e por imagem do sensor TM em 20 de novembro de 2009 para o município de Floresta-PE

#### 5.4 GPP estimada por imagem do sensor TM e produtos MODIS para 2009

Na Figura 8 é mostrada um diagrama de dispersão da GPP e o NDVI estimados a partir de imagens do sensor TM. O coeficiente de determinação mostra-nos que em torno de 85% da variação nos valores de GPP é explicado pelo modelo linear através do NDVI.

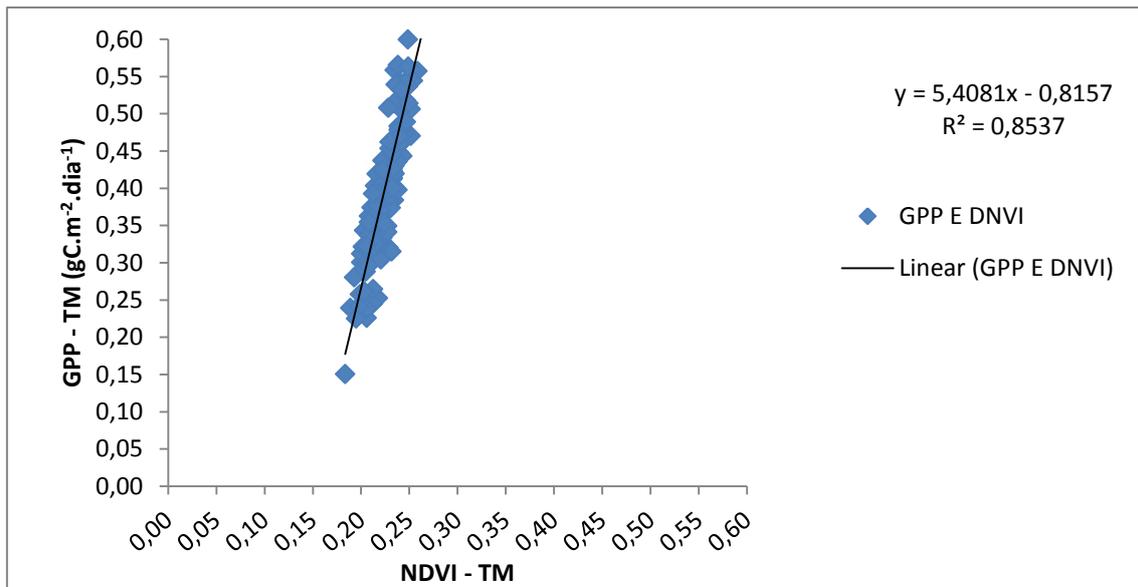


Figura 8 – Diagrama de dispersão da GPP versus o NDVI estimados por imagem do sensor TM em 20 de novembro de 2009 para o município de Floresta-PE

Os valores de GPP estimados a partir do produto MOD09GA mostraram-se um pouco maiores, com média de  $0,984 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  e desvio padrão de  $0,136 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  do que aqueles gerados pela imagem do sensor TM cujo valor é  $0,350 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  e desvio padrão de  $0,634 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ . Essa diferença pode ser atribuída, além dos fatores acima citados na comparação entre NDVI estimados por esses dois sensores, ao maior valor da radiação global para o dia em que foi gerada a imagem MODIS,  $33,91 \text{ MJ. m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para este e  $31,7 \text{ MJ. m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para do sensor TM. Com o mesmo padrão de classificação e cores para as duas imagens essa diferença não é evidente visualmente como mostrado na Figura 11. Pelos histogramas de frequência das imagens de GPP geradas pelos sensores MODIS e TM que são mostrados nas Figuras 9 e 10 é possível verificar tais diferença. Na maior parte da área os valores de GPP variam entre  $0,066$  e  $0,263 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para a estimativa realizada pelo TM e entre  $0,29$  e  $0,99 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para o MODIS.

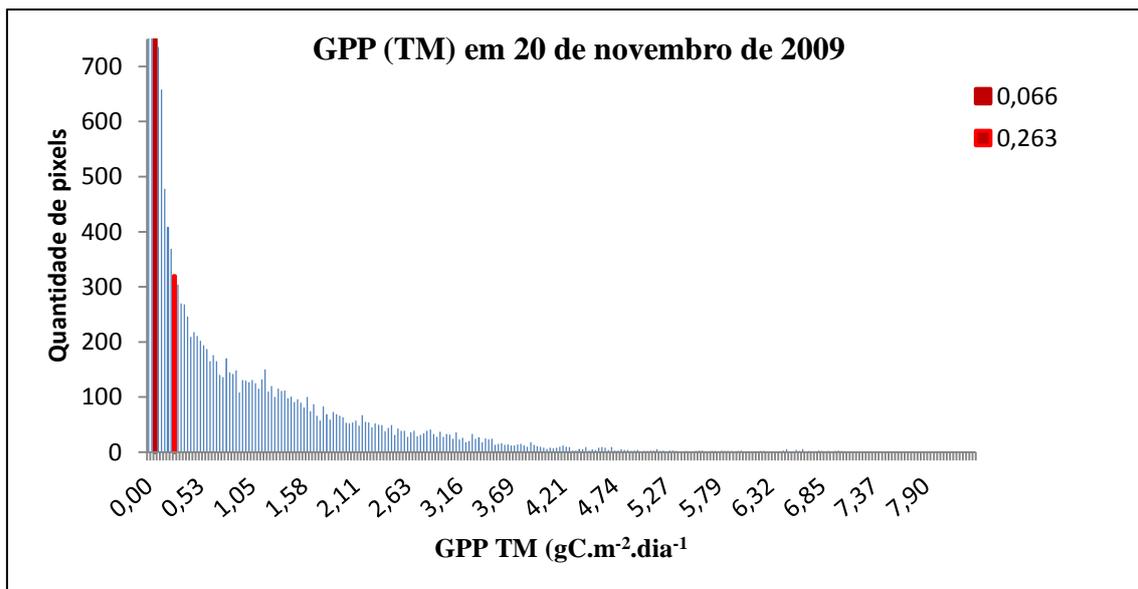


Figura 9 - Histograma de frequência da GPP gerada por imagem do sensor TM em 20 de novembro de 2009 para o município de Floresta-PE

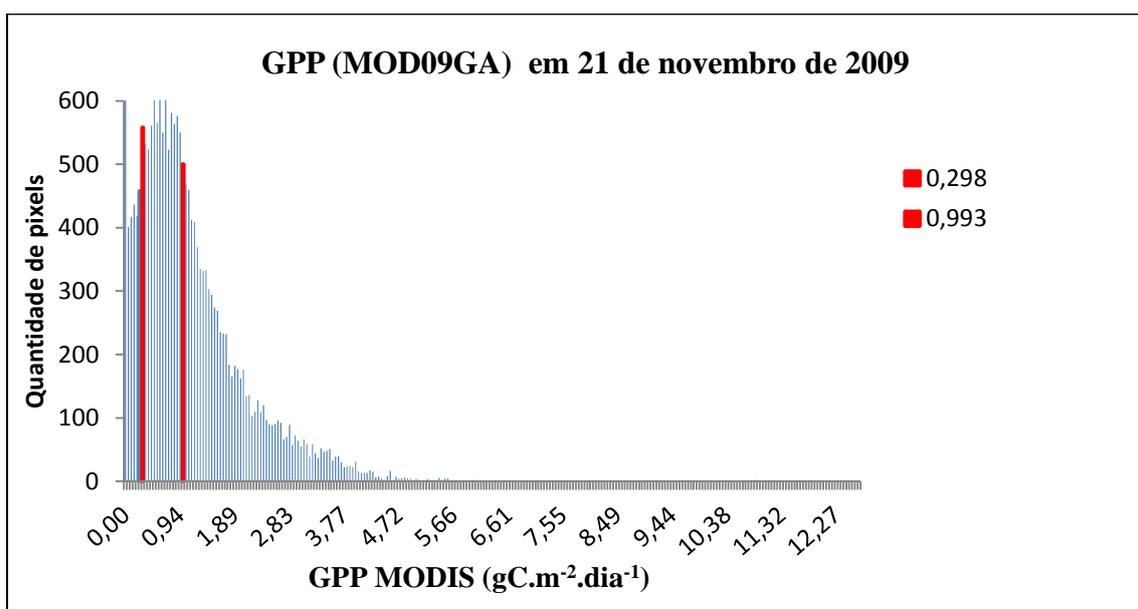


Figura 10 - Histograma de frequência da GPP gerada por imagem do produto MOD09GA em 21 de novembro de 2009 para o município Floresta-PE

Os valores de GPP estimados por imagem TM e MODIS (MOD09GA) em novembro de 2009 foram confrontados com os obtidos com imagem MOD17A2 da data 25 de novembro de 2009. Esse produto fornece dados de GPP ( $\text{kgC.m}^{-2}$ ) em uma composição de oito dias em escala global com resolução espacial de 1km. A comparação entre imagem do sensor TM e imagem do produto MOD17A2 obteve um valor de Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) de  $1,09 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  e Erro Absoluto

Médio (EAM) de  $0,95 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ . Silva et al. (2013) encontraram valores de 1,12 e  $0,91 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  em relação a essas duas formas de obtenção da GPP.

Os valores de REQM e EAM da GPP encontrados em relação aos produtos MOD17A2 e MOD09GA mostraram-se ligeiramente piores, quando comparado com a GPP obtidas do MOD17A2 e TM. Nesta comparação os valores da Raiz do Erro Quadrático Médio e do Erro Absoluto Médio foram de 1,49 e  $1,14 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , respectivamente e os valores encontrados entre TM e MOD09GA foram de 2,1609 e  $1,7406 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  da REQM e EAM, nesta mesma ordem.

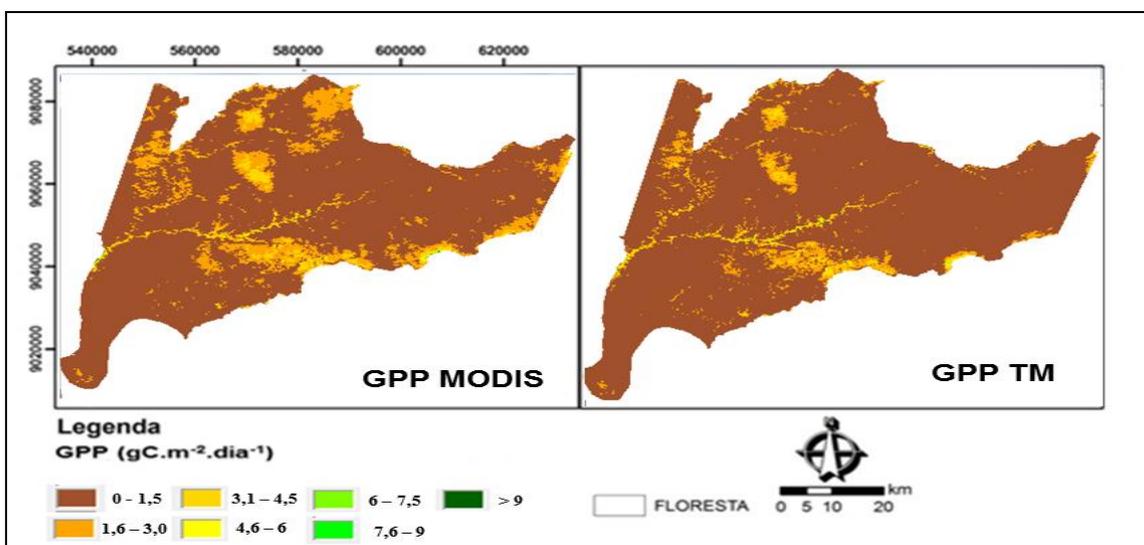


Figura 11 – Mapa da GPP estimada por imagem MOD09GA em 21 de novembro e TM em 20 de novembro de 2009 para o município de Floresta-PE

### 5.5 Correlação entre imagem do sensor TM e o produto MOD09GA

Após a reamostragem da imagem do sensor TM para 500 m e assim estivesse na mesma resolução espacial da imagem do produto MOD09GA, foi verificada se há correlação entre GPP desses dois sensores, o resultado é encontrado na Figura 12. A significância da correlação foi verificada pelo teste t e assim, a hipótese de nulidade foi rejeitada a 1% de probabilidade. Pelos dados analisados e com o  $r=0,75$  verificou-se um  $t_{\text{cal}}$  de 5,68 em comparação com o  $t_{\text{tab}}$  de 2,467. O coeficiente de determinação foi de  $R^2=0,56$  o que em tese significa que 56% da variação dos dados é explicado pelo modelo.

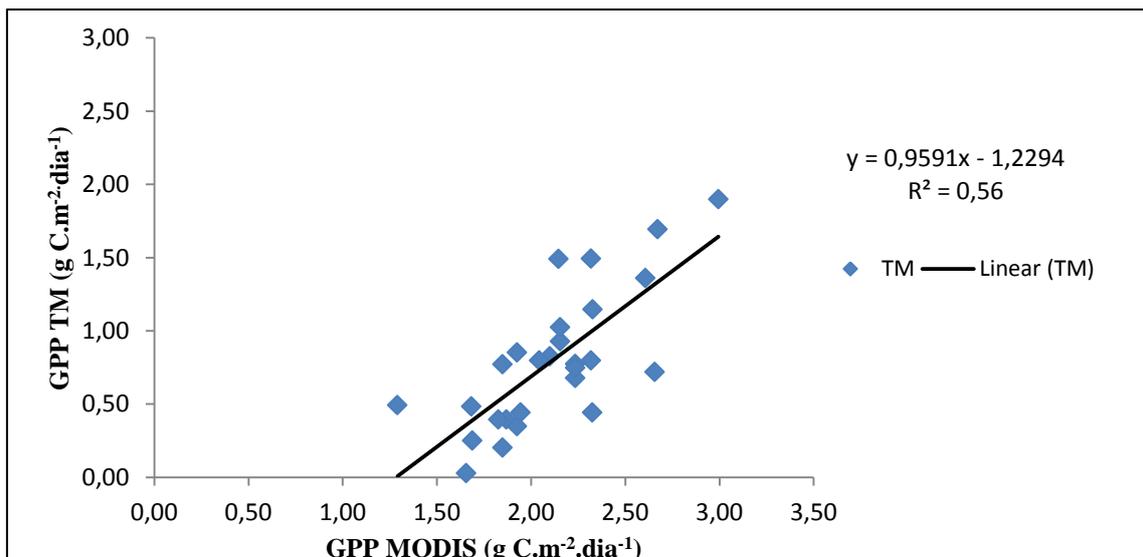


Figura 12 – Diagrama de dispersão entre GPP estimada por imagem MOD09GA em 21 de novembro e TM em 20 de novembro de 2009 para o município de Floresta-PE

## 5.6 Análise temporal do NDVI por imagens do sensor TM

Os valores observados do NDVI diferiram bastante no intervalo de tempo estudado, na data 18 de novembro 1985 em uma amostra de 660 pixels, percebeu-se um valor médio de 0,26058 enquanto nos mesmos pontos em 20 de novembro de 2009, o valor foi de 0,1299, com desvio padrão de 0,022 para 1985 e 0,0142 para 2009, respectivamente. Analisando estatisticamente com o teste t, as médias diferiram ao nível de 1 % de probabilidade entre as datas estudadas. Silva et al. (2009) encontraram para a Floresta-PE, na mesma área de estudo, valores de NDVI de 0,373 e 0,261 para os anos de 1994 e 2001, respectivamente. Os autores atribuem essa diferença a ocorrência de precipitação na época da aquisição das imagens, neste trabalho foi verificando uma precipitação de 6 mm para a data 20 de novembro de 2009 e 0 mm para 18 de novembro de 1985. De forma semelhante, Lira et al. (2011) encontraram valores de NDVI para caatinga na ordem de 0,33, classificando como sendo área de alto adensamento da vegetação combinado com um baixo percentual de solo exposto, condições esta verificada predominantemente para novembro de 1985, como mostra a Figura 13. Observa-se, ainda, que os coeficientes de variação nas duas ocasiões foram de 0,08 e 0,109, respectivamente, isso mostra que os dados referentes ao ano de 1985 mostraram menos discrepante em relação à média, que há mais homogeneidade entre os valores dos pixels, o que, em termo comparativo, não ocorreu com o ano 2009.

Com base nos resultados obtidos, é notória a diferença apresentada entre os anos estudados, isso mostra de certa forma, uma supressão da vegetação nesse intervalo de tempo. Observando a temperatura média da superfície estimada para as duas datas em questão, 30°C para 18 de novembro de 1985 e 39°C para 20 de novembro de 2009, representando um aumento de 30% entre nas datas estudadas, Tabela 2. Isto é visível observando a Figura 13 que mostra o NDVI nas duas datas. Percebe-se que em 1985 há uma predominância de pixels com valores maiores que 0,2 o que demonstra maior vigor vegetativo na região. Ao contrário do que ocorre em 2009 onde ocorreu uma predominância de pixels entre 0 e 0,2, porém se verifica que para esta data, os pixels de maiores valores, acima de 0,3, estão localizados nas áreas de maiores altitudes, fato verificado por imagem SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission* – Missão Shuttle de Topografia por Radar), e a Sudeste onde há a presença de uma Floresta decídua, situada na Reserva Biológica da Serra Negra. Observando nessa área de reserva, percebe-se que houve um aumento nos valores de NDVI em 2009, o que nos leva a afirmar que nas áreas de menores altitudes e onde não há esse instrumento de preservação ambiental, houve um decréscimo na cobertura vegetal no período de tempo estudado. Este resultado corrobora com os encontrados por Silva et al. (2009) quando analisavam a dinâmica da cobertura vegetal em Floresta-PE.

Para o ano de 2009, notou-se uma maior cobertura da área com valores de NDVI próximos de zero, indicando maior presença de solo exposto, o que, comparativamente não ocorre com a mesma intensidade para a mesma área no ano de 1985.

**Tabela 2 – Média da temperatura da superfície e NDVI estimados por imagem TM e registro de precipitação do mês de novembro ate a data da geração da imagem para o município de Floresta-PE**

PARÂMETRO	Data	
	18/11/1985	20/11/2009
NDVI	0,260	0,129
TEMPERATURA	30°C	39°C
PRECIPITAÇÃO	1 a 18/11/1985 0 mm	1 a 20/11/2009 7 mm

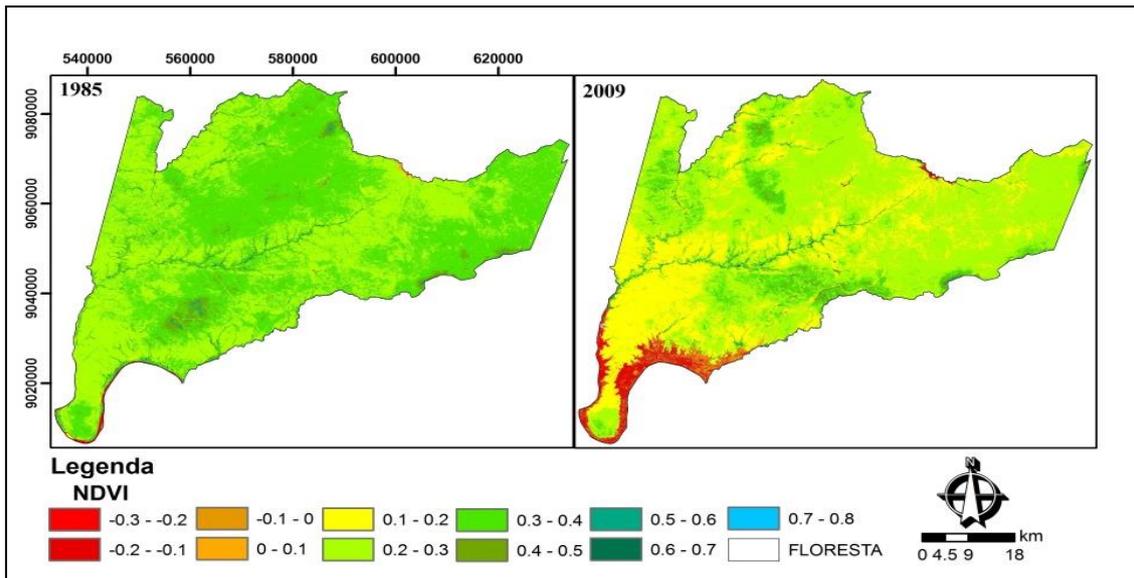


Figura 13 – Mapa do NDVI em 18 de novembro de 1985 e 20 de novembro de 2009 obtidos por imagens do sensor TM para o município de Floresta-PE

### 5.7 Análise temporal da GPP por imagens do sensor TM

Os valores da GPP das três áreas classificadas como degradada, moderadamente degradada e preservada são mostrada na Figura 14. Os maiores valores de GPP são observados na área preservada, como se era de esperar, em virtude da maior densidade da vegetação nesta área em comparação com as demais

A comparação entre os anos estudados mostra que é evidente a diferença na GPP nas duas datas, podemos atribuir essa diferença ao processo de supressão da vegetação ocasionado pela degradação. Isto é mais evidente quando se observa que em determinada áreas, mas precisamente as de maiores altitudes e as que fazem parte da Reserva Biológica da Serra Negra, houve um acréscimo da GPP, ao contrário do que ocorreram nas demais áreas. O fator importante que poderia está influenciando em uma ou outra data seria a precipitação, e nas ocasiões não foram registrados volumes expressivos de precipitação pluvial, anterior à passagem do satélite, que pudesse interferir em tal resultado. Dessa forma, é possível afirmar que ouve uma considerável degradação da área de estudo, corroborando com os resultados encontrados por Silva et al. (2009); Silva, (2011); Alves et al. (2009) e Barbosa et al. (2006) os quais verificaram que a região vem sofrendo processo de degradação devido a ações antrópicas.

Observando apenas em 2009, a diferença entre as áreas degradada e conservada, observando extremos, é cerca de 91% (média de  $0,389 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para a área

conservada e  $0,035 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para área degradada. Isso daria em torno de 3,5 toneladas de carbono para a área conservada e apenas 315 kg para a área degradada.

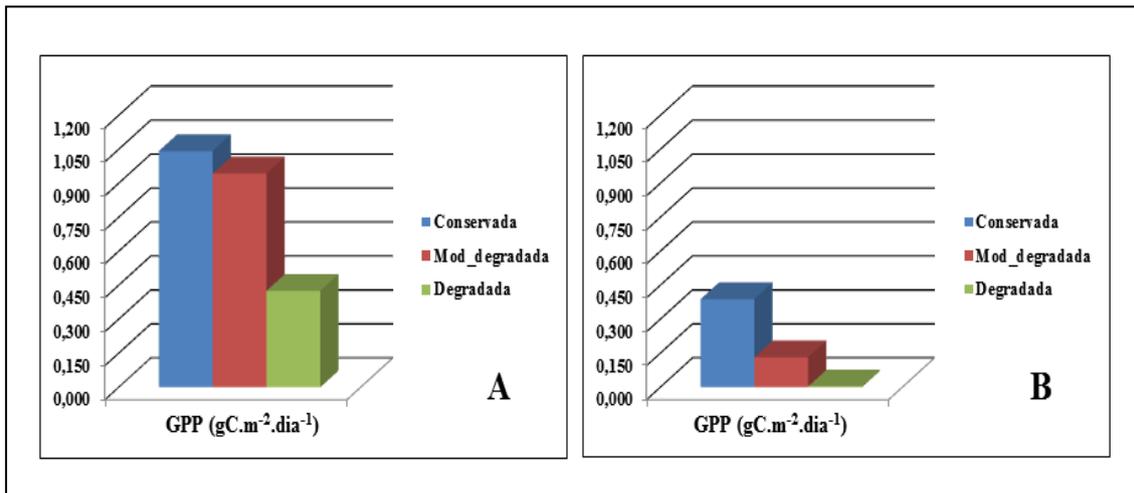


Figura 14 - A- GPP estimada por imagem TM para área degradada, moderadamente degradada e conservada em 20 de novembro de 1985. B- GPP estimada por imagem TM para as mesmas áreas em 20 de novembro de 2009

Na Figura 15, pode-se observar os contraste existente entre as duas cenas estudadas, em ambas, encontra-se valores de GPP entre  $0,0$  e  $1,5 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , locais que apresentam esses valores são possivelmente locais com solo exposto ou com vegetação em que houve o processo de perda de folhas, comum para as plantas dessa região. Porém, verifica-se que ano de 1985 existe uma maior presença de área em amarelo, o que representa valores de GPP variando entre  $1,6$  até  $6,0 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , os valores nesse intervalo são encontrados também no ano de 2009 e são verificados principalmente em locais de maiores altitudes e a oeste na Reserva da Serra Negra na divisa entre o município de Floresta e o de Ibimirim-PE.

A média da GPP verificada, dentro de uma parcela da área de caatinga, para 1985 foi de  $1,934 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , com desvio padrão de  $0,327 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ . Para a mesma área em 2009 foi observado uma média de  $0,160 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , e desvio padrão de  $0,242 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ . Essas médias diferiram entre si a 1% de probabilidade pelo teste de t. Isto nos subsidia a afirmar que neste intervalo de tempo houve um decréscimo em torno de 90% em todo o carbono armazenado na área, mesmo sendo a radiação global para a data 18 de novembro de 1985 muito menor que o apresentado para a data 20 de novembro de 2009, sendo  $25,34$  e  $33,9 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , respectivamente. Outro fator que influencia no cômputo da GPP é a eficiência do uso da luz que nas duas datas distintas não variaram de forma significativa, mínimo de  $0,966$  e máximo de  $0,988 \text{ g.MJ}^{-1}$  para a data em 1985 e mínimo de  $0,957$  e máximo de  $0,989 \text{ g.MJ}^{-1}$  para 20 de novembro de 2009. Além

desses, ao se observar o NDVI é notória a diferença entre as datas, verificando que os valores para 2009 foram muito menores que os de 1985, assim, pode-se afirmar que tais diferenças podem ser causadas pela degradação nas áreas estudadas, corroborando com as considerações realizadas por Alves et al. (2009); Silva (2011), onde verificaram que a interação clima e ação antrópica, em especial a pecuária extensiva e a exploração da floresta, contribuíram para alterações estruturais da caatinga e que estas se refletem em suas várias formas e estágios de sucessão ecológica. Assim como Barbosa et al. (2006) atribuíram a variação da cobertura vegetal no Nordeste brasileiro ao impacto da aridez com maior ocorrência durante as últimas décadas do século 20.

A cobertura vegetal em áreas de caatinga está altamente correlacionada com a precipitação, motivo pelo qual é de se esperar que os anos que apresentaram maior índice pluviométrico antes da passagem do satélite Landsat sejam exatamente os que apresentam maior aumento da cobertura vegetal; no entanto, alguns processos antrópicos, como a extração de madeira sem manejo adequado, podem ser mais expressivos do que a resposta da vegetação ao regime pluvial.

Silva et al. (2013) encontraram valores máximos de GPP, para um perímetro irrigado do semiárido paraibano, em torno de  $10 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , o máximo verificado neste trabalho, como mostra a Figura 17 foi de  $12 \text{ gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ . No mesmo trabalho os autores encontraram para área não irrigada formada por vegetação nativa e agricultura de sequeira, valores variando entre 0,272 e 0,401  $\text{gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para 19 de dezembro de 2008, assim, esses valores se assemelham mais ao encontrado para 20 de novembro de 2009. Gitelson et al. (2008) determinaram a GPP, através do NDVI, para um área cultivada com milho, encontrando valores entre 5,0 e 8,0  $\text{gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , enquanto que para uma região semiárida do Cazaquistão Propastin et al. (2007) encontraram valores variando entre 0,93 e 1,74  $\text{gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ .

Os padrões de obtenção da GPP devem variar para cada tipo de vegetação, devido à especificidade de cada local quanto ao aspecto climático e densidade florística, porém semelhanças entre esses diferentes biomas, fazem com que os valores e a forma de obtenção de GPP sejam parecidos, dessa forma Siyan Ma et al. (2007) determinaram a GPP para várias paisagens em Nevada, Califórnia. Os valores que mais se assemelharam aos da Caatinga foi em área de Savana, variando entre 0,241 e 3,049  $\text{gC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  entre os anos de 2001 e 2006.

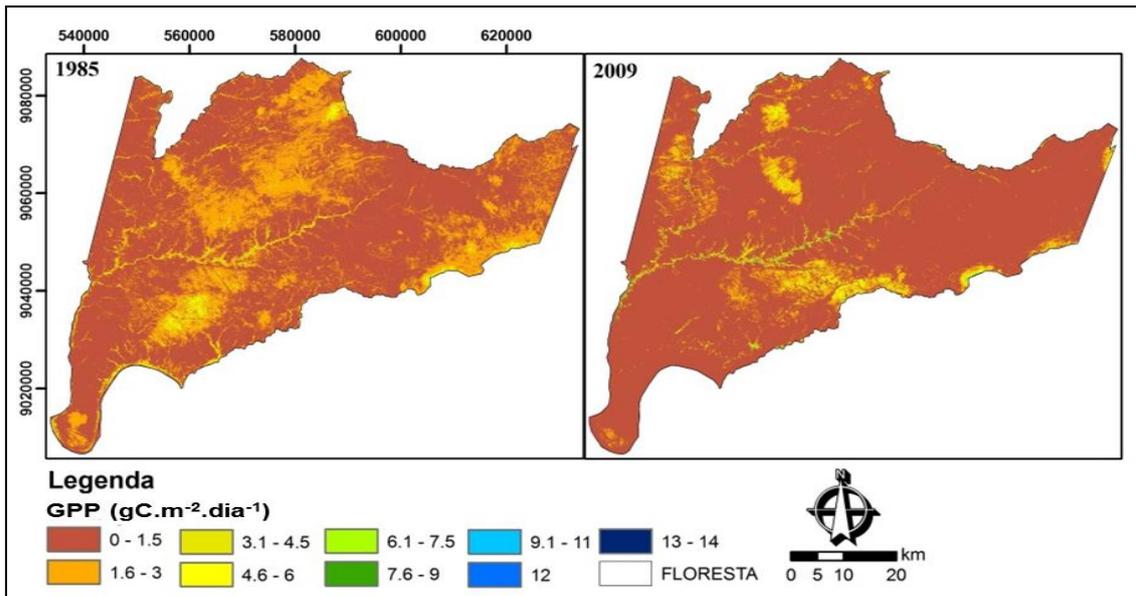


Figura 15 – Mapa da GPP estimada para 18 de novembro de 1985 e 20 de novembro de 2009, ambos por imagens TM para o município de Floresta-PE

## 6 CONCLUSÕES

- A quantidade de carbono armazenada pela caatinga e o NDVI no município de Floresta-PE foram reduzidos no intervalo de tempo estudado, isto principalmente devido à supressão da vegetação.
- As imagens dos produtos MODIS e sensor TM se mostraram capazes de estimar a GPP e NDVI em áreas de caatinga bem como identificar as mudanças na cobertura vegetal;
- A distribuição mensal do NDVI concentrou-se em maior proporção nos meses onde foram registrados os maiores volumes de chuva precipitados e variaram durante o ano acompanhando a distribuição da chuva para aquela região;
- A área de caatinga degradada estocou apenas 9% e a moderadamente degradada 33,93% do total de carbono armazenado pela área preservada para 2009, para 1985 essa diferença é de 40,84% para área degradada e 91,41% para moderadamente degradada;
- Entre 1985 e 2009, na área classificada como degradada, foi constatada uma redução em torno de 50% nos valores de NDVI, evidenciando um decréscimo considerável na cobertura vegetal na região.
- A GPP estimada por imagem TM teve melhor relação com a GPP obtida pelo produto MOD17A2 do que a estimada pelo produto MOD09GA.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Kimberly: University of Idaho, Advanced Training and User's Manual, 98p. 2002.
- ALVES, J. J. A.; ARAÚJO, M. A. A.; NASCIMENTO, S. S. Degradação da Caatinga: Uma Investigação Ecogeográfica. **Caatinga**, v. 22, n. 3, p.126-135, 2009.
- ANDERSON, L. O. A.; LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E.; Sensor MODIS: Uma Abordagem Geral. São José dos Campos, SP: INPE, 2003.
- ANDRADE, L. A.; OLIVEIRA, F. X.; NEVES, C. M. L.; FELIX, L. P. Análise da vegetação sucessional em campos abandonados no agreste paraibano, **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 2, n. 2, p.135-142, 2007.
- ANYAMBA, A.; TUCKER, C. J. Analysis of Sahelian Vegetation Dynamics Using NOAA-AVHRR NDVI Data From 1981–2003. **Journal of Arid Environments**, v. 63 p.596-614, 2005.
- AQUINO, C. M. S.; ALMEIDA, J. A. P.; OLIVEIRA, J. G. B. ESTUDO DA Cobertura vegetal/uso da terra nos anos de 1987 e 2007 no núcleo de degradação/desertificação de São Raimundo Nonato - Piauí. **RA'E GA**, Curitiba n. 25, p.252-278, 2012. Disponível em: <[www.geografia.ufpr.br/raega](http://www.geografia.ufpr.br/raega)>. Acesso em: 7 mar 2013.
- ARAÚJO FILHO, J.C.; SILVA, A. B.; SILVA, F. B. R.; LEITE, A. P. Diagnóstico Ambiental do Município de Floresta. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2001. (Circular Técnica).
- AS-SYAKUR, A. R.; OSAWA, T.; ADNYANA, I. W. S. Estimation of Gross Primary Production using satellite data and gis in urban area, Denpasar. **International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences**, v.7, p.84-95, 2010
- BARBOSA, H. A., A. R. HUETEA, AND W. E. BAETHGENB. A 20-year study of NDVI variability over the northeast region of Brazil, **Journal Arid Environmente**, n. 67, p. 288–307, 2006.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; ALI, S. A New Crop Yield Forecasting Model Based on Satellite Measurements Applied Across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. 94, p.321–340, 2003.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v.212-213, p.198-212, 1998a.
- BOLFE, E. L.; BATISTELLA, M.; FERREIRA. M. C. Correlação de variáveis espectrais e estoque de carbono de biomassa aérea de sistema agroflorestais. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p.1261-1269, 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, IBAMA. **Monitoramento do Bioma Caatinga 2002 a 2008**. Brasília, DF, 2010.

BUCHER, E. H. 1982. Chaco and Caatinga South American Arid Savannas, woodlands and thickets. p. 48-79 In: Ecology of tropical Savannas (HUNTEY, B.J. & B.H. WALTHER, ed.) Springer-Verlag, New York.

CALIXTO JUNIOR, J. T.; DRUMOND, M. A. Estrutura Fitossociológica de um fragmento de Caatinga *Sensu Stricto* 30 anos após corte raso, **Revista Caatinga**, v. 24, n. 2, p.67-74, 2011.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; SAMPAIO, C. S.; SILVA, N. C.; COUTO JÚNIOR, A. F.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO, A. P. F.; SHIMABUKURO, Y. E. Classificação de padrões de savana usando assinaturas temporais NDVI do sensor MODIS no Parque Nacional Chapada dos Veadeiros. **Revista Brasileira de Geofísica**, n. 26(4), p.505-517, 2008.

CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A.; PERES, L. E. P. Manual de fisiologia vegetal. 1ª ed. Piracicaba, SP: Ed. Agronômica Ceres, 650p. 2005.

CERQUEIRA, D. B. de; 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. **Anais XIII SBSR**, Florianópolis, INPE, p.2413-2419, 2007.

CHAVEZ Jr., P.S. Image-based atmospheric correc. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.55, p.1285-1294, 1989.

COLTRI, P. P.; RAMIRES, G. M.; WALTER, M. K. C.; ZULLO JUNIOR, J.; PINTO, H. S.; NASCIMENTO, C. R.; GONSALVES, R. R. V. Utilização de índices de vegetação para estimativas não-destrutivas da biomassa, estoque e sequestro de carbono do café Arábica. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 14. 2009, Natal. Anais. São José dos Campos: INPE, 2, p.121-128. 2009.

COSTA, A S.; SOUZA JR., C. M. Comparação entre imagens Landsat ETM+ e MODIS/TERRA para detecção de incrementos de desmatamento na região do baixo Acre. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 57(02), p.93-102, 2005.

COSTA, T. C. C.; OLIVEIRA, M. A. J.; ACCIOLY, L. J.; SILVA, F. H. B. B. Análise da degradação da caatinga no núcleo de desertificação do Seridó (RN/PB). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, (Suplemento), p.961-974, 2009.

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

DANTAS, F. R. C.; BRAGA, C. C.; SOUZA, E. P.; SILVA, S. T. A. Determinação do Albedo da Superfície a partir de Dados AVHRR/NOAA E TM/Landsat-5, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.1, p.24-31, 2010.

DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C. R. L. Análise temporal do uso do solo e comparação entre os índices de vegetação NDVI e SAVI no município de Santa Cruz do Rio Pardo – SP usando imagens Landsat-5, **RA'EGA**, Curitiba, n. 21, p. 234-271, 2011. Disponível em: < [www.ser.ufpr.br/raega](http://www.ser.ufpr.br/raega)>. Acesso em: 7 mar 2013.

DONG, J.; KAUFMANN, R.; MYNENI, R.; TUCKER, C.; KAUPPI, P., Remote Sensing Estimates of Boreal and Temperate Forest Woody Biomass: Carbon Pools, Sources, and Sinks **Remote Sensing of Environment**. 84, p.393–410, 2003.

ELMORE, A. J.; MUSTARD, J. F.; MANNING, S. J.; LOBELL, D. B. Quantifying Vegetation Change in Semiarid Environments: Precision and Accuracy of Spectral Mixture Analysis and the Normalized Difference Vegetation Index. **Remote Sensing of Environment**. 73, p.87-102, 2000.

GALINDO, I. C. L. Relações solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no estado de Pernambuco, UFRPE, tese de Doutorado, Departamento de agronomia, área de solo, 248p, 2007.

GITELSON, A. A.; VIÑA, A.; MASEK, J. G.; VERMA, S. B.; SUYKER, A. E. Synoptic Monitoring of Gross Primary Productivity of Maize Using Landsat Data. **Ieee Geoscience and Remote Sensing Letters**, V.5, n. 2, p.133-137, 2008.

GÜRTLER, S.; EPIPHANIO, J. C. N.; LUIZ, A. J. B.; FORMAGGIO, A. R. Planilha eletrônica para o cálculo da reflectância em Imagens TM e ETM+ LANDSAT. **Revista Brasileira de Cartografia**, n 57/02, p.162-167, 2005.

HILKER, T.; NICHOLAS C. COOPS, N. C.; WULDER, M. A.; BLACK, T. A.; GUY, R. D. The use of Remote Sensing in light use Efficiency based Models of Gross Primary Production: A review of current status and future requirements. **Science of the total environment**. 404, p.411-423, 2008.

HOODA, R. S.; DYE, D. G. Estimating Carbon-fixation in India based on Remote Sensing Data. Proceedings Asian Congress of Remote Sensing, 1996. Disponível em: <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1996/ts1003.shtml>. Acesso em 28/08/2012.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, **Remote Sensing of Environment**, n. 83, p.195-213, 2002.

IBRAHIM, A.B. An Analysis of Spatial and Temporal Variation of Net Primary Productivity over Peninsular Malaysia Using Satellite Data. Ph. D. Thesis, **University Teknologi Malaysia**, Johor, Malaysia, 2006.

IQBAL, M. An Introduction to Solar Radiation. New York: Academic Press. 212p.1983.

KLEIN, S. A. Calculation of Monthly Average Insolation on Titled Surfaces. **Solar Energy**, v. 19, p.325-329, 1977.

LEAL, I. R.; SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M.; LACHER JR, T. E. Mudando o curso da conservação da biodiversidade na Caatinga do Nordeste do Brasil. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p.139-146, 2005.

LIRA, R. B.; DIAS, N. S.; ALVES, S. M. C.; BRITO, R. F.; SOUZA NETO, O. N. Efeitos dos sistemas de cultivo e manejo da Caatinga através da análise dos indicadores químicos de qualidade do solo na produção agrícola em Apodi, RN. **Revista Caatinga**, v. 25, n. 3, p. 18-24, 2012.

LIRA, V. M.; SILVA, B. B.; NETO, J. D.; AZEVEDO, C. A. V.; EULER SOARES FRANCO, E. S. Variação Sazonal da Cobertura Vegetal em áreas do submédio São Francisco a partir de dados NDVI e imagens TM-Landsat 5. **ENCICLOPEDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer**, v. 33, n.12, p.1-9, 2011.

MARKHAM, B.L.; BARKER, J.L. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. *International Journal of Remote Sensing*, v.8, n.3, p.517-523, 1987.

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**, n. 21, p.5-18, 2009.

MONTEITH, J. L. Solar Radiation and Productivity in Ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, v.9 p. 747-766, 1972.

MORAIS, E. C., Fundamentos de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos, SP: DSR/INPE, 2002.

MOREIRA, A. M. Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação. 4ª ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 422p, 2011.

NORA, E. L. D.; MARTINI, D. Z. Análise da dinâmica sazonal de fitofisionomias do bioma Mata Atlântica com base em índices de vegetação do sensor MODIS/TERRA, **Ambiência**, v. 6, n. 1, p.97-108, 2010.

OCHI, S.; SHIBASAKI, R. Estimation of NPP based agricultural production for Asian countries using Remote Sensing data and GIS. **Institute of Industrial Science**, Univ. of Tokyo, 1999.

PICOLLI, M. C. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.3, p.789-795, 2009.

PROPASTIN, P.; KAPPAS, M.; ERASMI, S.; MURATOVA, N. Estimation of carbon balance in dry lands of Kazakhstan by integrating remote sensing and field data with an ecosystem model. **Conference on International agricultural research for development**. University of Kassel-Witzenhausen and University of Göttingen, Germany, 2007.

RAMOS, A. M.; SANTOS, L. A. R.; FONTES, L. T. G. **Normais Climatológicas do Brasil**, 1901 – 1990, Brasília, DF, INMET, 465p, 2009.

ROSA, V. G. C.; MOREIRA, M. A.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M. Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.45, n.12, p.1478-1488, 2010.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings of Third ERTS-1 Symposium, Washington, DC, 10–14 December, NASA, SP-351, v. 1, p.309–317, 1973.

SHIMABUKURO, Y. E.; NOVO, E. M.; PONZONI, F. J. ÍNDICE DE VEGETAÇÃO E MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL NO MONITORAMENTO DA REGIÃO DO PANTANAL **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.33, Número Especial, p.1729-1737, 1998.

SILVA, A. E. Mapeamento do uso e cobertura vegetal do município de Floresta-PE, UFRPE, Dissertação de Mestrado, Departamento de Eng. Florestal, 56p, 2011.

SILVA, A. P. N.; MOURA, G. B. A.; GIONGO, P. R.; SILVA, A. O. Dinâmica Espaço-Temporal da Vegetação no Semiárido de Pernambuco. **Revista Caatinga**, v.22, n.4, p.195-205, 2009.

SILVA, B. B. da, LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. de. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.2. p.243-252, 2005.

SILVA, B. B.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.14, n.2, p.174-186, 2006.

SILVA, B. B.; GALVÍNCIO, J. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MACHADO, C. C. C.; OLIVEIRA, L.M.; MOURA, M. S. B. Determinação por Sensoriamento Remoto da Produtividade Primária Bruta do perímetro irrigado São Gonçalo-PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 28, n. 1, p. 57-64, 2013.

SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M.; FONSECA, M. V. Biodiversidade da Caatinga: Áreas e ações prioritárias para a conservação. **Ministério do Meio Ambiente**, Brasília, 2002.

SIYAN MA, S.; BALDOCCHIA, D. D.; XU, L.; HEHNA, T. Inter-annual variability in carbon dioxide exchange of an oak/grass savanna and open grassland in California **Agricultural and Forest Meteorology**. n. 147, p.157–171, 2007.

SOARES, J. V.; BATISTA, G. T.; SHIMABUKURO, Y. E. História e descrição do Sensor MODIS. In: RUDIRFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBELLOS, J. C. (Org.). **O Sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, p.3-22, 2007.

STEVEN, M.D.; MALTHUS, T. J., BARET, F.; XU, H.; CHOPPING, M. J. Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems. **Remote Sensing of Environment**, n. 88, p.412-422, 2003.

TABARELLI, M. & A. VICENTE. 2003. Conhecimento Sobre Plantas Lenhosas da Caatinga: lacunas geográficas e ecológicas, p. 101-112 In: Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias (SILVA, J.M.C, M. TABARELLI, M.F, FONSECA & L.V. LINS, orgs.). MMA, Brasília, DF.

TROVÃO, D. M. B. M.; FERNANDES, P. D.; ANDRADE, L. A.; DANTAS NETO, J. Variações sazonais de aspectos fisiológicos de espécies da Caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 307-311, 2007.

TURNER, D. P.; RITTS, W. D.; WHARTON, S; THOMAS, C.; MONSON, R. BLACK, T. A.; FALK, M. Assessing FPAR Source and Parameter Optimization Scheme in Application of a diagnostic Carbon flux Model. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 7, p.1529-1539, 2009.

VAN TUYL, S.; LAWA, B. E.; TURNER, D. P.; GITELMAN, A. I. Variability in net Primary Production and Carbon Storage in Biomass across Oregon Forests-An Assessment Integrating Data from Forest Inventories, Intensive Sites, and Remote Sensing. **Forest Ecology and Management**, n. 209, p.273-291, 2005.

XIAO X.M; HOLLINGER D.; ABER J, et al. (2004a) Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needle-leaf forest. **Remote Sensing of Environment**, p.89:519-34, 2004.

ZERDA, H. R., TIEDEMANN, J. L. Dinámica temporal del NDVI del bosque y pastizal natural en el Chaco Seco de la Provincia de Santiago del Estero, Argentina. **Ambiência**, v. 6, n. 1, p.13-24, 2010.