

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS EM ANOS SECO,  
NORMAL E CHUVOSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIACHO  
EXU NO SERTÃO DE PERNAMBUCO A PARTIR DE  
SENSORIAMENTO REMOTO**

**FREDERICO ABRAÃO COSTA LINS**

**RECIFE-PE  
2018**

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS EM ANOS SECO,  
NORMAL E CHUVOSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIACHO  
EXU NO SERTÃO DE PERNAMBUCO A PARTIR DE  
SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – PGEA da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE como parte das exigências para obtenção do título de **Mestre** em Engenharia Agrícola. Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo. Linha de Pesquisa: Agrometeorologia.

**RECIFE-PE**

**2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

L759a Lins, Frederico Abraão Costa  
Avaliação de parâmetros biofísicos em anos seco, normal e chuvoso da bacia hidrográfica do riacho Exu no sertão de Pernambuco a partir de sensoriamento remoto / Frederico Abraão Costa Lins. – 2018.  
72 f. : il.

Orientador: Geber Barbosa de Albuquerque Moura.  
Coorientador: Fabrício Marcos de Oliveira Lopes.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, BR-PE, 2018.  
Inclui referências.

1. Agrometeorologia 2. Sensoriamento remoto 3. Índices de Vegetação 4. Eventos extremos 5. Semiárido I. Moura, Geber Barbosa de Albuquerque, orient. II. Lopes, Fabrício Marcos de Oliveira, coorient. III. Título

CDD 631

**FREDERICO ABRAÃO COSTA LINS**

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS DA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIACHO EXU NO SERTÃO DE PERNAMBUCO  
A PARTIR DE SENSORIAMENTO REMOTO**

---

**Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura – UFRPE**

(Orientador)

---

**Prof. Dr. Pabrcio Marcos Oliveira Lopes – UFRPE**

(Examinador interno)

---

**Prof. Dr. Ranyere Silva Nóbrega - UFPE**

(Examinador externo)

---

**Prof. Dra. Cristina Rodrigues Nascimento - UFRPE**

(Examinadora externa)

DEDICO:

Aos meus pais Abraão e Betânia

Ao meu irmão Felipe

A todos meus amigos e familiares

“Quando alguém encontra seu caminho precisa ter coragem suficiente para dar passos errados.

As decepções, as derrotas, o desânimo são ferramentas que Deus utiliza para mostrar a  
estrada.”

(Paulo Coelho)

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Antônio Abraão Lins Filho e Betânia Ribeiro Costa, pois sem eles nada disso seria possível e é para eles que a cada dia acordo pensando em ser uma pessoa melhor;

Ao meu irmão Felipe Ribeiro Costa Lins por estar sempre ao meu lado em todos os momentos;

Ao meu amigo e irmão Alberes Amorim por todo apoio, por abrir a porta da sua casa sem pestanejar e provar que família é muito além que laços de sangue;

Ao meu professor e orientador Geber Moura, por ter, com muita paciência me orientado neste trabalho e por ser um ser humano o qual tive a sorte de conhecer e trabalhar;

À todos professores, que tive oportunidade de receber seus ensinamentos, em especial meu coorientador professor Fabrício Lopes e ao professor Mário Rolim o qual não mediu esforços para conseguir minha bolsa;

Aos todos meus companheiros do PGEA, que tanto me deram força e auxílio nessa caminhada, em especial Jhon Lennon, Leandro, Iug, Andrey, Valentin, Adiel, Fernando, Fernanda, Fred, Bruno, Pedro, Douglas, Diego, Diógenes, Francisco e Laercia.

À minha namorada Ana Flávia, por todo amor, carinho e companheirismo que a mim concede;

Aos meus amigos e irmãos, Alan, Eduardo, Rodrigo e Felipe por fazer parte e acompanhar toda essa jornada, aos meus amigos de infância, Edu, Gledson, Diego e Ygor por fazer parte de toda minha formação pessoal;

E a todos aqueles que têm participação fundamental na minha caminhada: Wellane, Valentina, Adenires, César, Rômulo, Gildo, Thiago, Rodrigo, Ciro, Charles, Edson, Ewerton e todos os meus tios, tias, primos e primas;

À todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização de mais essa etapa da minha vida, muito obrigado!

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	x
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xi
RESUMO .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 Geral .....	17
2.2 Específicos.....	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 Bioma caatinga .....	18
3.2 Técnica dos Quantis.....	18
3.3 Índice de Anomalia de Chuva (IAC).....	19
3.4 Sensoriamento remoto .....	20
3.5 Programa <i>Landsat</i> .....	20
3.6 <i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i> (SEBAL).....	22
3.7 Albedo da superfície.....	23
3.8 Índices de vegetação.....	24
3.8.1 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI).....	24
3.8.2 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI).....	25
3.8.3 Índice de Área Foliar (IAF).....	25
3.9 Temperatura da superfície .....	26
4. METODOLOGIA.....	27
4.1 Área de estudo .....	27
4.2 Dados meteorológicos .....	29
4.3 Técnica dos quantis .....	30
4.4 Índice de Anomalia de Chuva (IAC).....	31
4.5 Dados orbitais.....	32
4.6 Correção atmosférica e parâmetros biofísicos.....	34
4.6.1 Calibração radiométrica e radiância (ETAPA 1).....	35
4.6.2 Reflectância monocromática (ETAPA 2).....	36
4.6.3 Albedo planetário (ETAPA 3).....	37
4.6.4 Albedo da superfície (ETAPA 4).....	38
4.6.5 Índices de vegetação (ETAPA 5).....	40

4.6.6 Emissividades (ETAPA 6).....	41
4.6.7 Temperatura da superfície (ETAPA 7).....	42
4.7 Análise estatística .....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	43
5.1 Técnica dos quantis .....	43
5.2 Índice de Anomalia de Chuva .....	45
5.3 Parâmetros biofísicos.....	46
5.3.1 Albedo da superfície.....	46
5.3.2 NDVI.....	49
5.3.3 SAVI.....	53
5.3.4 IAF.....	55
5.3.5 Temperatura da superfície .....	58
6. CONCLUSÕES .....	61
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa espacial de localização da bacia hidrográfica do riacho Exu, Serra Talhada-PE. ....	27
<b>Figura 2.</b> Classificação do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do riacho Exu. ....	28
<b>Figura 3.</b> Gráfico da precipitação mensal média da série histórica. ....	30
<b>Figura 4.</b> Gráfico de precipitação total anual da série histórica. ....	30
<b>Figura 5.</b> Fluxograma das etapas de processamento dos parâmetros biofísicos. ....	34
<b>Figura 6.</b> Índice de Anomalia de Chuva para bacia hidrográfica do riacho Exu, Serra Talhada-PE. ....	45
<b>Figura 7.</b> Cartas temáticas do albedo da superfície para bacia hidrográfica do riacho Exu em anos Seco Normal e Chuvoso para os períodos seco 20/09/2016 (A), 01/09/2009 (B) e 26/09/1989 (C) e chuvoso 08/03/1991 (D), 27/03/2004 (E) e 31/03/2011 (F). ....	47
<b>Figura 8.</b> Cartas temáticas do NDVI para bacia hidrográfica do riacho Exu em anos Seco Normal e Chuvoso para os períodos seco 20/09/2016 (A), 01/09/2009 (B) e 26/09/1989 (C) e chuvoso 08/03/1991 (D), 27/03/2004 (E) e 31/03/2011 (F). ....	51
<b>Figura 9.</b> Cartas temáticas do SAVI para bacia hidrográfica do riacho Exu em anos Seco Normal e Chuvoso para os períodos seco 20/09/2016 (A), 01/09/2009 (B) e 26/09/1989 (C) e chuvoso 08/03/1991 (D), 27/03/2004 (E) e 31/03/2011 (F). ....	54
<b>Figura 10.</b> Cartas temáticas do IAF para bacia hidrográfica do riacho Exu em anos Seco Normal e Chuvoso para os períodos seco 20/09/2016 (A), 01/09/2009 (B) e 26/09/1989 (C) e chuvoso 08/03/1991 (D), 27/03/2004 (E) e 31/03/2011 (F). ....	56
<b>Figura 11.</b> Cartas temáticas da temperatura da superfície para bacia hidrográfica do riacho Exu em anos Seco Normal e Chuvoso para os períodos seco 20/09/2016 (A), 01/09/2009 (B) e 26/09/1989 (C) e chuvoso 08/03/1991 (D), 27/03/2004 (E) e 31/03/2011 (F). ....	59

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Características de cada banda utilizada dos sensores TM e OLI/TIRS. ....	22
<b>Tabela 2.</b> Características físico-hídricas da bacia hidrográfica do riacho Exu. ....	28
<b>Tabela 3.</b> Dados de entrada e variáveis no momento da passagem do satélite. ....	29
<b>Tabela 4.</b> Intervalos de classe para classificação da precipitação anual. ....	31
<b>Tabela 5.</b> Classificação de Intensidade do Índice de Anomalias de Chuva. ....	32
<b>Tabela 6.</b> Dados orbitais das imagens no momento da passagem do satélite. ....	33
<b>Tabela 7.</b> Descrição das bandas do Mapeador Temático (TM) do <i>Landsat 5</i> , com os coeficiente de calibração (Radiância mínima – $L_{\text{mín}}$ e máxima – $L_{\text{máx}}$ para o período: antes de maio/2003 ( $L_{\text{máx } 1}$ ), maio/2003 a abril/2007 ( $L_{\text{máx } 2}$ ) após abril/2007 ( $L_{\text{máx } 3}$ )) e irradiâncias espectrais no topa da atmosfera (TOA). ....	35
<b>Tabela 8.</b> Determinação das classes e intervalo médio da precipitação anual relacionada com as ordens quantílicas. ....	43
<b>Tabela 9.</b> Classificação do perfil histórico da precipitação de acordo com a técnica dos Quantis para bacia hidrográfica do riacho Exu no município de Serra Talhada no período de 1986 a 2016. ....	44
<b>Tabela 10.</b> Classificação do Índice de Anomalia de Chuva para bacia hidrográfica do riacho Exu. ....	46
<b>Tabela 11.</b> Parâmetros estatísticos do albedo da superfície para bacia hidrográfica do riacho Exu. ....	48
<b>Tabela 12.</b> Parâmetros estatísticos do NDVI para bacia hidrográfica do riacho Exu. ....	52
<b>Tabela 13.</b> Parâmetros estatísticos do SAVI para bacia hidrográfica do riacho Exu. ....	55
<b>Tabela 14.</b> Parâmetros estatísticos do IAF para bacia hidrográfica do riacho Exu. ....	57
<b>Tabela 15.</b> Parâmetros estatísticos da temperatura da superfície para bacia hidrográfica do riacho Exu. ....	60

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ERTS-1	<i>Earth Resources Technology Satellite</i>
ETM	<i>Enhanced Thematic Mapper</i>
ETM+	<i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>
IAC	Índice de Anomalia de Chuva
IAF	Índice de área foliar ( $m^{-2} m^{-2}$ )
SAVI	<i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
IV	Infravermelho
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LANDSAT	<i>Land Remote Sensing Satellite</i>
MSS	<i>Multispectral Scanner System</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>
TIRS	<i>Thermal Infrared Sensor</i>
TOA	Topo da Atmosfera
TM	<i>Thematic Mapper</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
WGS	<i>World Geodetic System</i>
RBV	<i>Return-Beam Vidicon</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

W	Água precipitável
$\alpha$	Albedo
$\alpha_{toa}$	Albedo planetário de cada pixel
$\alpha_{sup}$	Albedo da superfície de cada pixel para os efeitos atmosféricos
E	Ângulo de elevação do Sol
b (subscrito)	Bandas do <i>Landsat 5</i> TM e 8 OLI
$r_{b\ IV}$ e $r_{b\ V}$	Bandas refletivas 4 e 3 do <i>Landsat 5</i> TM e bandas 5 e 4 do <i>Landsat 8</i> OLI, respectivamente
$L_{b6}$	Banda termal do satélite <i>Landsat 5</i> de sensor TM
$L_{b10}$	Banda termal do <i>Landsat 8</i> de sensor TIRS
L	Constante de ajuste do solo (SAVI)
$K_1$ e $K_2$	Constantes de calibração das bandas termais do <i>Landsat 5</i> TM (banda termal 6, $L_{b6}$ ) e do <i>Landsat 8</i> TIRS (banda termal 10, $L_{b10}$ ), extraídos dos metadados
kPa	Kilopascal
DSA	Dia Sequencial do Ano
$\epsilon_a$	Emissividade atmosférica do ar
$\epsilon_{NB}$	Emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal
$\epsilon_o$	Emissividade de cada pixel no domínio da banda larga
K	Graus Kelvin
°C	Graus Celsius
h	Hora
$d_r$	Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol
$k_{b\ Land\ 5}$	Irradiância solar espectral de cada uma das bandas refletivas do <i>Landsat 5</i> TM no Topo da Atmosfera – TOA ( $W\ m^{-2}\ \mu m^{-1}$ )
$k_{b\ Land\ 8}$	Irradiância solar espectral de cada uma das bandas refletivas do <i>Landsat 8</i> OLI no Topo da Atmosfera – TOA ( $W\ m^{-2}\ \mu m^{-1}$ )
m	Metro
$m\ s^{-1}$	Metro por segundo
ND	Número Digital (nível de cinza)
P	Precipitação

$p$	Ordens quantílicas (percentis)
$P_o$	Pressão atmosférica instantânea medida na estação meteorológica automática da área em estudo (kPa)
$p_{b \text{ Land } 8}$	Pesos para cada banda do <i>Landsat</i> 8 OLI
$e_a$	Pressão real de vapor d'água atmosférico (kPa)
$e_s$	Pressão de saturação do vapor d'água (kPa)
$L_{\text{mín}}$	Radiância espectral mínima
$L_{\text{máx}}$	Radiância espectral máxima
$L_{b \text{ Land } 5}$ e $L_{b \text{ Land } 8}$	Radiância espectral de cada pixel em cada banda dos satélites <i>Landsat</i> 5 TM e 8 OLI ( $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ )
$\alpha_{\text{atm}}$	Refletância da própria atmosfera
$r_{b \text{ Land } 5}$ e $r_{b \text{ Land } 8}$	Refletância espectral monocromática de cada pixel em cada banda dos satélites <i>Landsat</i> 5 TM e 8 OLI ( $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ )
$\text{Add}_{\text{rad } b}$ e $\text{Add}_{\text{ref } b}$	Termo aditivo do satélite <i>Landsat</i> 8 OLI para radiância e refletância, respectivamente.
$\text{Mult}_{\text{rad } b}$ e $\text{Mult}_{\text{ref } b}$	Termo multiplicativo do satélite <i>Landsat</i> 8 OLI para radiância e refletância, respectivamente.
$T_{\text{ar}}$	Temperatura do ar instantânea medida na estação meteorológica automática ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_s$	Temperatura da superfície (graus Kelvin)
$T_{\text{med}}$	Temperatura média diária ( $^{\circ}\text{C}$ ), calculada a partir das temperaturas do ar máxima e mínima, medidas na estação meteorológica da área de estudo
$\tau_{\text{sw}}$	Transmissividade atmosférica instantânea no domínio da radiação solar para dias de céu claro
UR	Umidade Relativa do Ar
$\text{W m}^{-2}$	Watts por metro quadrado
Z	Ângulo zenital solar

LINS, F. A. C. **Avaliação de parâmetros biofísicos da bacia hidrográfica do Riacho Exu no sertão de Pernambuco a partir de sensoriamento remoto**. 2018. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife-PE.

**Autor: Frederico Abraão Costa Lins**

**Orientador: Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura**

## **RESUMO:**

Cada vez mais busca-se investigar sobre as ações antrópicas e sua relação com o uso e ocupação do solo. A utilização de imagens de satélites através do sensoriamento remoto e a formulação de algoritmos utilizados na modelagem de parâmetros biofísicos possibilitam estudos sobre fenômenos meteorológicos, uso e ocupação de solo. Há uma necessidade de melhor conhecer e interpretar as escalas da variabilidade pluviométricas bem como eventos extremos de secas e umidade, então desta forma, o monitoramento desses extremos pode ser efetuado através do emprego de índices de vegetação. A bacia hidrográfica do riacho Exu, situa-se no município de Serra Talhada, semiárido pernambucano, onde a escassez de água é um problema presente, sendo ela uma unidade fundamental para suporte ao planejamento com relação aos recursos naturais. O presente estudo objetivou identificar anos com eventos extremos à precipitação de uma série de 31 anos (1986-2016) utilizando técnica de quantis, índice de anomalias de chuva e também analisar dados biofísicos para mesma série de anos mediante uso de imagens orbitais do *Landsat 5 – TM* e *Landsat 8 - OLI/TIRS*. Os parâmetros biofísicos albedo da superfície, NDVI, SAVI, IAF e temperatura da superfície foram elaborados por meio do algoritmo SEBAL implementado no software ERDAS IMAGINE 9.1 na ferramenta Model Maker. As imagens utilizadas passaram por processo de correção atmosférica pelo método DOS no software QGIS 2. 18. 9 usando a ferramenta Semi-Automatic Classification Plugin. Dos 31 anos avaliados pela técnica dos quantis apenas 3 enquadraram-se como “Chuvoso”, 19 como “Normal” e 9 anos classificados como “Seco”. Nos dados avaliados utilizando o Índice de Anomalias de Chuvas foi constatado 16 anos com índices positivos variando de 0,47 a 8,24 e 15 anos com desvios negativos variando de -0,32 a -7,17. Os parâmetros biofísicos das imagens do período seco apresentaram maiores valores de albedo e temperatura da superfície comparada com as imagens do período chuvoso que por sua vez apresentaram maiores valores de índice de vegetação. Conclui-se que o IAC e a técnica dos quantis são ferramentas relevantes para classificação e avaliação da variabilidade pluviométrica enquanto a análise dos parâmetros biofísicos do albedo da superfície, NDVI, SAVI, IAF e temperatura da superfície por meio do SEBAL permitiu avaliar de maneira eficaz a dinâmica espaço-temporal na superfície da bacia.

**Palavras-chave:** Sensoriamento remoto; eventos extremos; índices de vegetação; cobertura vegetal; variabilidade espaço-temporal.

LINS, F. A. C. **Evaluation of biophysical parameters of the Exu streamlet basin in the semi-arid region of Pernambuco from remote sensing.** 2018. 72 f. Dissertation (Masters in Agricultural Engineering) – Federal Rural University of Pernambuco – UFRPE.

**ABSTRACT:**

Increasingly, we seek to investigate anthropic actions and their relationship with land use and occupation. The use of satellite images through remote sensing and the formulation of algorithms used in the modeling of biophysical parameters enable studies on meteorological phenomena, land use and occupation. There is a need to better understand and interpret the scales of rainfall variability as well as extreme events of droughts and humidity, so in this way, the monitoring of these extremes can be done through the use of vegetation indexes. The streamlet basin Exu is located in the city of Serra Talhada, semi-arid region of Pernambuco, where water scarcity is a present problem, being a fundamental unit to support planning with respect to natural resources. The present study aimed to identify years with extreme events to the precipitation of a series of 31 years (1986-2016) using quantis technique, index of rainfall anomalies and also to analyze biophysical data for the same series of years using orbital images of *Landsat 5 - TM* and *Landsat 8 - OLI / TIRS*. The biophysical parameters albedo of the surface, NDVI, SAVI, IAF and surface temperature were elaborated through the SEBAL algorithm implemented in ERDAS IMAGINE 9.1 software in the Model Maker tool. The images used went through atmospheric correction using the DOS method in QGIS 2. 18.9 software using the Semi-Automatic Classification Plugin. Of the 31 years evaluated by the technique of quantiles only 3 were classified as "Rainy", 19 as "Normal" and 9 years classified as "Dry". In the data evaluated using the Index of Rainfall Anomalies it was observed 16 years with positive indexes ranging from 0.47 to 8.24 and 15 years with negative deviations ranging from -0.32 to -7.17. The biophysical parameters of dry season images showed higher values of albedo and surface temperature compared to rainy season images, which in turn had higher values of vegetation index. It is concluded that the RAI and quantiles are relevant tools for classification and evaluation of rainfall variability while the analysis of the biophysical parameters of the surface albedo, NDVI, SAVI, IAF and surface temperature by means of the SEBAL allowed to evaluate effectively the spatial-temporal dynamics on the surface of the basin.

**Keywords:** Remote sensing; extreme events; vegetation indices; vegetal cover; spatio-temporal variability

## 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da ciência, cada vez mais busca-se investigar sobre as ações antrópicas e sua relação com o uso e ocupação do solo, principalmente em regiões semiáridas inseridas no nordeste do Brasil. O Semiárido brasileiro é formado por um conjunto de espaços que se caracterizam pelo balanço hídrico negativo, resultante das precipitações médias anuais inferiores a 800 mm, insolação média de 2800 h ano<sup>-1</sup>, temperaturas médias anuais de 23° a 27° C, evaporação de 2.000 mm ano<sup>-1</sup> e umidade relativa do ar média em torno de 50% (MOURA et al., 2007).

Essas regiões têm como bioma predominante a Caatinga, que se trata de um dos biomas mais ameaçados do Brasil, com grande parte de sua área tendo sido bastante modificada pelas ações antrópicas e pelas condições extremas naturais da região principalmente por causa dos ciclos fortes de secas e a irregularidade das chuvas, ocasionado baixos índices pluviométricos (abaixo de 800 mm por ano). Outro grande problema enfrentado na região é a ausência de sistemas eficientes para o armazenamento da água afetando o desenvolvimento das atividades agrárias e agropecuárias (MARENGO et al., 2011).

Há uma necessidade de melhor conhecer e interpretar a variabilidade pluviométrica bem como eventos extremos de secas e umidade. Então desta forma, o monitoramento desses períodos pode ser efetuado através do emprego de índices. Com base neles, pode-se desenvolver um sistema de acompanhamento das características dos períodos secos ou chuvosos, observando as diferenças das medidas a serem efetivadas de acordo com os valores atingidos por tais índices (DA SILVA, 2009).

O conhecimento dos processos físicos que envolvem as trocas de energia e massa entre a superfície e a atmosfera dependentes do uso e cobertura do solo são importantes, principalmente em bacias hidrográficas. Com isso as técnicas de sensoriamento remoto permitem de maneira eficaz o monitoramento e avaliação de parâmetros biofísicos por meio de algoritmos, em destaque a aplicação do algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), que tem se mostrado bastante preciso em estimativas, como albedo e temperatura da superfície e os índices de vegetação: NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*) e IAF (Índice de Área Foliar), validado principalmente nos estudos em região semiárida (BASTIAANSEN et al., 1998a; BEZERRA et al., 2014; LINS et al., 2017). A compreensão física quantitativa e cartográfica desses processos por meio de imagens orbitais de satélites podem auxiliar no manejo e conservação do meio ambiente, minimizando os impactos negativos decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais (PACHECO et al., 2014).

Estando a bacia hidrográfica do riacho Exu, situada no semiárido pernambucano, sendo a bacia hidrográfica uma unidade fundamental para suporte ao planejamento e tomadas de decisões com relação aos recursos naturais, o uso de estimativas de parâmetros biofísicos por sensoriamento remoto desenvolve uma importante ferramenta na detecção de possíveis alterações ambientais.

Tendo em vista um maior embasamento sobre o microclima da bacia, dada a importância do conhecimento de eventos extremos de secas no Sertão e da necessidade de melhor compreender a variabilidade das precipitações pluviométricas paralelo a importância das estimativas de parâmetros biofísicos da superfície do solo no suporte ao planejamento agroecológico e às decisões políticas com relação ao uso dos recursos naturais o presente trabalho objetivou avaliar os parâmetros biofísicos da superfície da bacia hidrográfica do riacho Exu em anos secos, normal e chuvoso.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Identificar anos de eventos extremos de precipitação em uma série de 31 anos utilizando técnica de quantis, Índice de Anomalias de Chuva e analisar parâmetros biofísicos para mesma série de anos mediante uso de imagens orbitais do *Landsat 5 – TM (Thematic Mapper)* e *Landsat 8 - OLI/TIRS (Operacional Land Image Sensor Thermal Infrared Sensor)*.

### **2.2 Específicos**

- Classificar os anos de acordo com a precipitação anual em Seco, Normal ou Chuvoso, utilizando a técnica dos quantis;
- Avaliar e a variabilidade temporal da precipitação na bacia hidrográfica do riacho Exu empregando o IAC (Índice de Anomalia de Chuva);
- Avaliar e monitorar dinâmica espaço-temporal de parâmetros biofísicos (Albedo da superfície, NDVI, SAVI, IAF e temperatura da superfície) na cobertura vegetal da bacia hidrográfica do riacho Exu, a partir de imagens orbitais.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Bioma Caatinga**

Este bioma é típico de regiões semiáridas e ocupa a maior parte da região Nordeste do Brasil, considerada uma das mais pobres do país. Em função da ineficiência de políticas socioambientais a população acaba explorando seus recursos de forma insustentável. Os polos produtores de gesso tem grande contribuição na exploração do bioma, que vêm sendo degradado entre outros fatores pela expansão das fronteiras agropecuárias, bem como pelo crescimento da malha urbana (SILVA et al., 2010).

Segundo Pereira (2008), a caatinga é a cobertura vegetal da região semiárida do Nordeste brasileiro, tipo singular de vegetação xerófila. É vegetação tortuosa, espinhenta, de folhas pequenas e caducas, constituída por arbustos e árvores de pequeno porte sobre um estrato herbáceo. É rica em cactáceas, bromeliáceas, euforbiáceas e leguminosas, porém é pobre em gramíneas

A caatinga pode ser encontrada através de três estratos vegetais: arbórea, arbustiva e herbácea. Grande parte da vegetação apresenta folhas perenes, devido a este fato, no período seco, a maioria das espécies arbóreas e arbustivas perdem suas folhas, constituindo assim, uma estratégia utilizada para diminuir a evapotranspiração (FARIAS et al., 2013).

Os padrões morfológicos da vegetação dependem das condições edafoclimáticas locais, podendo apresentar-se com um porte arbóreo e denso, até um subarbustivo aberto. Com frequência, em áreas mais impactadas, a densidade de plantas lenhosas diminui, predominando gramíneas e cactáceas. Um dos fenômenos mais espetaculares da Caatinga é a perda da folhagem da maioria das espécies no período de estiagem e sua exuberante recuperação no período das chuvas (GUIMARÃES, 2009).

#### **3.2 Técnica dos Quantis**

Pinkayan (1966) foi o primeiro a empregar essa técnica para caracterizar as ocorrências de anos secos e chuvosos na região continental dos Estados Unidos. A intenção do pesquisador era verificar a possibilidade de poder definir padrões na distribuição de anos secos e de anos chuvosos para toda a área de estudo, e se essas ocorrências eram sistemáticas e se apresentariam regularidade.

As vantagens provenientes da técnica dos quantis, é que além de haver uma relevante simplicidade conceitual, proporciona uma interpretação precisa em termos probabilísticos ou também das distribuições empíricas das frequências associadas, como também, os quantis podem ser estimados diretamente a partir de dados empíricos, embora também possam ser determinados por modelo teórico ajustado aos dados. E tem um emprego seguro e imune a falsa interpretações, portanto recomendável à avaliação de déficit ou superávit pluviométrico em trabalhos de monitoração de chuva (XAVIER, 2001).

Diversas aplicações dessa técnica foram utilizadas para regiões do Brasil com o intuito de caracterizar períodos secos ou chuvosos. Xavier (1999) utilizou a técnica dos quantis para reavaliar anos de seca (1979 a 1983; 1993), a quadra chuvosa ano de 1997 e avaliação de desempenho para a seca de 1998 no Estado do Ceará.

### **3.3 Índice de Anomalia de Chuva (IAC)**

A previsão e o monitoramento de períodos de secas ou chuvosos no nordeste brasileiro são particularmente úteis devido aos seguintes aspectos: (1) a existência de inúmeros projetos de irrigação implantados e a serem implantados ao longo dos principais rios; (2) o abastecimento d'água das grandes cidades é, em sua maioria, dependente direto do escoamento dos rios, ou indiretamente do volume acumulado nas barragens; (3) a maioria das culturas agrícolas dependem exclusivamente da regularidade das chuvas e (4) a possibilidade de uso de água subterrânea é pequena quando comparada ao da água superficial (FREITAS, 2004; 2005).

De acordo com Repelli et al. (1998) o IAC é uma potencial ferramenta para aplicações de monitoramento de eventos extremos de precipitação, tendo em vista a facilidade de acesso aos dados de precipitação em tempo real, ressaltando ainda que este índice parece ser apropriado para a utilização em regiões semiáridas e/ou tropicais, especialmente para o Nordeste do Brasil.

Da Silva et al. (2009) aplicaram o IAC buscando identificar o comportamento das precipitações na bacia do rio Mundaú (entre os Estados de Pernambuco e Alagoas) utilizando dados de precipitação de 1955 a 1991 da Agência Nacional de Águas (ANA). Os resultados demonstraram que foi detectado, através do IAC anual, um “ponto de inversão” na série de precipitação. No Baixo Mundaú, o período antes de 1974 é mais úmido que o posterior a

1974. Para o Médio e Alto Mundaú, o período depois de 1974 foi mais úmido que o anterior a esse ano.

### **3.4 Sensoriamento remoto**

Sensoriamento remoto é uma das mais bem sucedidas tecnologias de coleta automática de dados para o levantamento e monitoração dos recursos terrestres em escala global e tem suas bases nos princípios que levaram ao desenvolvimento das câmeras fotográficas aéreas para se obter, a partir de avião, fotografias da superfície terrestre. O princípio básico é o registro dos alvos por meio da detecção do fluxo de radiação eletromagnética refletida pelas superfícies dos objetos terrestres (MENESES, 2012).

Gusmão et al. (2012) alegam que é cada vez mais evidente a possibilidade de identificar alterações que ocorrem na superfície terrestre, resultantes de fenômenos naturais e, ou antrópicos, muito dos quais podem ser diagnosticados a partir do monitoramento das trocas radiativas à superfície.

Ferreira et al. (2013) também citam as técnicas sensoriamento remoto como alternativas para a análise ambiental, bem como para o monitoramento e planejamento na utilização dos recursos naturais. A utilização de imagens de satélites com diferentes resoluções espaciais, temporais e radiométricas, têm sido utilizadas como suporte às pesquisas, monitoramento e planejamento socioambiental.

Silva et al. (2010) afirmam que nos últimos anos, o sensoriamento remoto tem permitido a obtenção e a estimativa, com elevado grau de precisão, do albedo da superfície, de índices de vegetação, da temperatura da superfície, da emissividade, dos balanços de radiação e de energia à superfície e da evapotranspiração. Sendo assim, é capaz de proporcionar subsídios sobre área irrigada, tipo de cultura, desenvolvimento de biomassa, produtividade das culturas, necessidade de água das culturas, salinidade e perdas de água.

### **3.5 Programa *Landsat***

O programa *Landsat* (*Land Remote Sensing Satellite*) foi desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) no final da década de 60, tendo por objetivo coletar dados sobre os recursos naturais renováveis e não renováveis da superfície

terrestre. O programa *Landsat* contou com o lançamento de oito satélites. Atualmente, encontra-se em operação o *Landsat 8*, o mais moderno do programa (USGS, 2017a).

Em 1972 foi lançado o *Earth Resources Technology Satellite (ERTS- 1)*, posteriormente denominado *Landsat 1*. Em 22 de Janeiro de 1975 e 5 de março de 1978 foi feito o lançamento do *Landsat 2* e 3, respectivamente (USGS, 2017a). Nos anos de 1982 e 1984 foram lançados os satélites *Landsat 4* e 5 respectivamente, com o programa entrando em sua segunda geração. Sua principal inovação foi o sensor TM (*Thematic Mapper*), com resolução espacial de aproximadamente 30 metros e bandas distribuídas nas regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas, período de revisita de 16 dias e imagens com 8 bit (FLORENZANO, 2011).

Em 1993 o *Landsat 6* falhou ao lançá-lo, pois não conseguiu atingir a órbita com o novo sensor ETM (*Enhanced Thematic Mapper*) e foi perdido (USGS, 2017a). Em 1999, foi lançado o sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) a bordo do *Landsat 7*. Este trouxe poucas, mais significativas, inovações em relação ao sensor anterior, dentre estas uma banda pancromática de 15 m. Desde maio de 2003, em função de problemas técnicos, cerca de 24% das cenas ETM+ (principalmente em direção às bordas) apresentam falhas de recobrimento (FLORENZANO, 2011).

O satélite *Landsat 8* foi lançado em 11 de fevereiro de 2013, trouxe consigo novas possibilidades para a pesquisa no que diz respeito à produção de dados e informações espaciais, apresentando um conjunto de novos sensores: sensor espectral OLI (*Operation Land Imager*) e o sensor termal TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), que agregaram melhorias na resolução espectral, causando mudanças nos intervalos espectrais dos canais de todas as bandas (USGS, 2017b).

Na tabela 1 observam-se as principais características dos satélites do *Landsat 5 TM* e 8 OLI/TIRS com seus respectivos sensores e resoluções espectrais, espaciais, temporais e radiométrica.

**Tabela 1** - Características de cada banda utilizada dos sensores TM e OLI/TIRS.

	<b>Banda</b>	<b>Resolução espectral (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Resolução espacial (m)</b>	<b>Resolução temporal</b>	<b>Resolução radiométrica</b>
<b>Landsat 5 Sensor TM</b>	1	0,45 – 0,52	30	16 dias	8 bits (256 tons de cinza)
	2	0,52 – 0,60	30		
	3	0,63 – 0,69	30		
	4	0,76 – 0,90	30		
	5	1,55 – 1,75	30		
	6	10,40 – 12,50	120		
	7	2,08 – 2,35	30		
<b>Landsat 8 Sensores OLI/TIRS</b>	2	0,45 – 0,51	30	16 dias	16 bits (65.535 tons de cinza)
	3	0,53 – 0,59	30		
	4	0,64 – 0,67	30		
	5	0,85 – 0,88	30		
	6	1,57 – 1,65	30		
	7	2,11 – 2,29	30		
	10	10,6 – 11,19	100		

Fonte: Adaptado de Silva (2016).

### **3.6 Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)**

O SEBAL é um modelo desenvolvido por Bastiaanssen (1995) que mira fazer estimativas dos componentes do balanço de energia e, por conseguinte, da evapotranspiração, baseado em combinações de relações empíricas e parametrizações físicas Bastiaanssen et al. (1998a). Segundo Courault et al. (2003), o método utiliza-se apenas das radiâncias espectrais registradas em sensores de satélites e de um conjunto mínimo de dados meteorológicos de superfície que incluem a velocidade do vento e a temperatura do ar para resolver o balanço de energia à superfície da terra

De acordo com Compaoré et al. (2008) o SEBAL se destaca entre os demais algoritmos pelas seguintes razões: (1) consiste em um algoritmo baseado fisicamente em análises de imagens de satélite e requer um mínimo de informações meteorológicas; (2) faz uso de um grande número de variáveis ambientais e não as assume constantes espacialmente como é feito em muitos outros métodos; (3) é reduzida a necessidade da correção atmosférica das

informações em comprimentos de onda curta e térmica nas imagens. Isto amplia a aplicabilidade do SEBAL uma vez que as medições necessárias para correções atmosféricas não estão frequentemente disponíveis; (4) não somente é aplicado com o uso de imagens *Landsat* com resolução espacial de 30 a 120 m, mas também com imagens de outros sensores como o AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) e o Modis (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) os quais possuem resolução espacial que variam de 250 a 1100 m.

O SEBAL é um modelo que, dentre os outros, se notabiliza por fazer poucas relações e suposições empíricas e por fazer uso de dados multiespectrais de satélites complementados com poucas informações de superfície, tais como temperatura do ar e velocidade do vento, que são facilmente obtidas nas estações meteorológicas (NICÁCIO, 2008).

Segundo Ferraz et al. (2009), o SEBAL é baseado no balanço dos fluxos de energia a superfície que é proporcional ao saldo de radiação. O balanço de radiação ou saldo de radiação (Rn), por sua vez, consiste na diferença da radiação de ondas curtas que incide e reflete da superfície e da radiação de ondas longas incidente, refletida e emitida pela superfície. Desta forma, o saldo de radiação pode ser definido como a energia radiativa superficial, disponível para os diversos processos físico-bióticos, notadamente a evapotranspiração.

### **3.7 Albedo da superfície**

Silva et al. (2005a) dizem que o albedo de superfície pode ser definido pela razão entre o fluxo de radiação solar refletido e o incidente, sendo de grande importância em estudos ambientais na possível detecção de alterações na superfície terrestre resultantes de processos naturais e/ou antropogênicos, como desertificação, queimadas e mudanças no clima local.

Em sistemas ecológicos, o albedo controla as condições microclimáticas das culturas e a absorção de radiação, afetando aspectos físicos e fisiológicos, tais como o balanço de energia, evapotranspiração, fotossíntese e respiração (WANG et al., 2001).

O albedo varia conforme as características físico-químicas das superfícies e com o ângulo zenital, outro fator que pode promover variações do albedo são as atividades humanas, tais como desflorestamento, agricultura e urbanização. Em superfícies vegetadas, o albedo depende da textura do solo e das condições fisiológicas da copa da planta. Em um solo seco, o

albedo é expressivamente maior que o observado em um solo úmido, enquanto uma superfície lisa tem albedo maior que uma superfície rugosa (HARTMANN, 1994).

Segundo Silva et al. (2011), o período seco contribui significativamente para elevar os valores de albedo, assim como as áreas de baixa disponibilidade hídrica. De acordo com Cunha et al. (2013), as alterações no albedo acontecem devido às diferenças nas propriedades ópticas da folha entre a vegetação natural da caatinga. Os valores são maiores durante a estação seca, devido à redução de folhas verdes por consequência do baixo índice pluviométrico e baixa umidade do solo.

Silva (2016) observou valores para um pixel específico, diante dos distintos usos e ocupações do solo no município de Iguatu – CE, para área de caatinga e encontrou o valor de 0,14, áreas irrigadas de 0,27, urbana de 0,31, na água o valor foi de 0,04 e, em área de solo exposto foi de 0,33 e depende, principalmente, do tipo de solo exposto da região.

### **3.8 Índices de vegetação**

Diversos índices de vegetação têm sido propostos na literatura com o objetivo de explorar as propriedades espectrais da vegetação, especialmente nas regiões do infravermelho próximo. Esses índices são relacionados a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como biomassa, índice de área foliar (PONZONI, 2012).

#### **3.8.1 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)**

De acordo com Ponzoni (2012), o NDVI é utilizado como ferramenta para o monitoramento da vegetação subsidiando a construção de perfis sazonais e temporais das atividades da vegetação, como duração do período de crescimento, pico verde, mudanças fisiológicas das folhas e períodos de senescência, permitindo assim, comparações interanuais desses perfis. Segundo Bezerra et al. (2011) o NDVI é utilizado para destacar e caracterizar a vegetação da área em estudo, conseqüentemente a umidade do solo para realçar a biomassa vegetal. Bezerra et al. (2014) citam que este índice também pode ser utilizado para auxiliar estudos que tratem da temática da desertificação, além de avaliar a dinâmica espacial de corpos hídricos.

Cunha et al. (2012) analisaram multitemporalmente parâmetros biofísicos utilizando técnicas de sensoriamento remoto e processamento digital de imagens do sensor TM, *Landsat 5*

para um período de 23 anos na bacia hidrográfica de São João do Rio do Peixe no estado da Paraíba, e constataram para altitudes mais elevadas um aumento nos valores de NDVI em todos os anos e classes. Bezerra et al. (2014) notaram os maiores valores de NDVI no período de ocorrência de chuvas, que permitiram condições favoráveis à resiliência e ao desenvolvimento da cobertura vegetal da Caatinga e os menores valores de NDVI foram observados em áreas com pouca ou nenhuma vegetação no período seco para região.

### **3.8.2 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI)**

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo - SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), desenvolvido por Huete (1988), assume uma constante de ajuste de solo no denominador da equação do NDVI, no intuito de minimizar os efeitos do solo, melhorando a resposta espectral da vegetação. As condições de fundo do solo exercem considerável influência sobre o dossel e os índices de vegetação calculados, especialmente em vegetação mais esparsa.

Souza (2014) detectou para o município João Pessoa na Paraíba a partir do uso de sensoriamento remoto através de imagens orbitais do sensor TM do *Landsat 5* nos anos de 1991, 2006 e 2010 as maiores médias de SAVI sobre áreas de vegetação arbórea/arbustiva e herbácea, logo os menores valores foram encontrados sobre as áreas de solo exposto e urbana.

### **3.8.3 Índice de Área Foliar (IAF)**

O Índice de Área Foliar (IAF) é uma medida de cobertura vegetal importante, por causa da importância das folhas nas trocas de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera (CARUZZO & ROCHA, 2000).

Segundo Leblanc & Chen (2001) o índice de área foliar é um parâmetro dinâmico que pode variar tanto de um dia para o outro, como de um ano para outro de acordo com a dinâmica da floresta, podendo também ser afetada pelas condições de iluminação do momento em que as medições estão sendo realizadas.

O índice de área foliar é uma medida da cobertura vegetal, definida pela razão entre a área total de folhas e pela unidade de área do solo ocupada por esta vegetação e é uma importante variável biofísica da vegetação usada em vários modelos de produção primária através de escalas e modelos globais de clima, hidrologia, biogeoquímica e ecologia (SANCHES et al., 2008).

Cunha et al. (2012) também verificaram no IAF padrão de distribuição análogo ao NDVI para a cobertura vegetal em bacia hidrográfica na região semiárida e perceberam aumento de IAF dos anos estudados, de acordo o aumento da altitude.

### **3.9 Temperatura da superfície**

Para Liu et al. (2006), a temperatura da superfície pode ser um parâmetro chave para diversos estudos do meio ambiente. Segundo Weng & Quattrochi (2006), Julien & Sobrino (2009) este é um parâmetro de grande interesse em trabalhos práticos, como os estudos de mudanças climáticas e o monitoramento agrometeorológico e ambiental podendo contribuir em programas de irrigação e de gestão de recursos hídricos, além do monitoramento do uso solo e na vegetação.

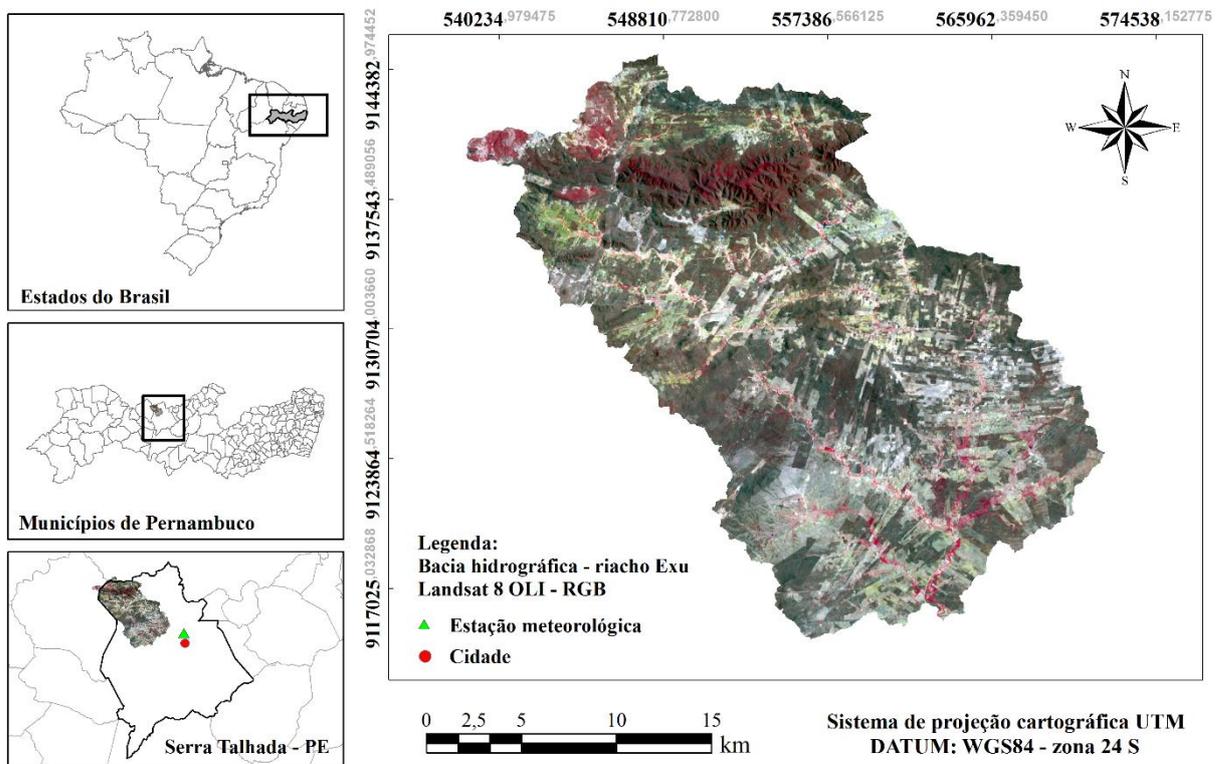
A temperatura da superfície é um elemento de grande valor dos processos físicos, químicos e biológicos da superfície terrestre em escala regional e global, que estão relacionados ao balanço de energia, evaporação, desertificação e pode ser utilizada como um indicador de degradação terrestre (ZHANG et al., 2009).

Souza et al. (2016) observaram as mudanças do uso e ocupação no solo em diferentes classes, com imagens orbitais do sensor TM, para o município de João Pessoa – PB e observaram os maiores valores de temperatura da superfície sobre área urbana e solo exposto e, de acordo com a variação encontrada identificaram um aumento da área urbana em praticamente todas as porções do Município.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Área de estudo

A área de estudo é a bacia hidrográfica do riacho Exu localizada nas seguintes coordenadas geográficas 8°00'06" S e 38°25'43" W, situada no Sertão do Pajeú em Serra Talhada, Pernambuco com acesso pela rodovia federal BR-232, km 44.8. A Figura 1 apresenta a área de estudo a partir de uma imagem do satélite *Landsat 8 OLI* na data 20/09/2016.



**Figura 1.** Mapa espacial de localização da bacia hidrográfica do riacho Exu, Serra Talhada-PE.

A região é caracterizada pelo clima tipo semiárido, quente e seco, de temperatura média anual superior a 30°C e precipitação na faixa de 400 a 800 mm anuais, com chuvas de verão que se atrasam para o outono. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima é do tipo BSh. O período chuvoso tem início em novembro e estende-se até abril. (CPRM, 2005).

A bacia hidrográfica do riacho Exu possui desde solos jovens como Neossolos, a solos mais evoluídos como Argissolos ocorrendo também Planossolos e Cambissolos. (SANTOS,

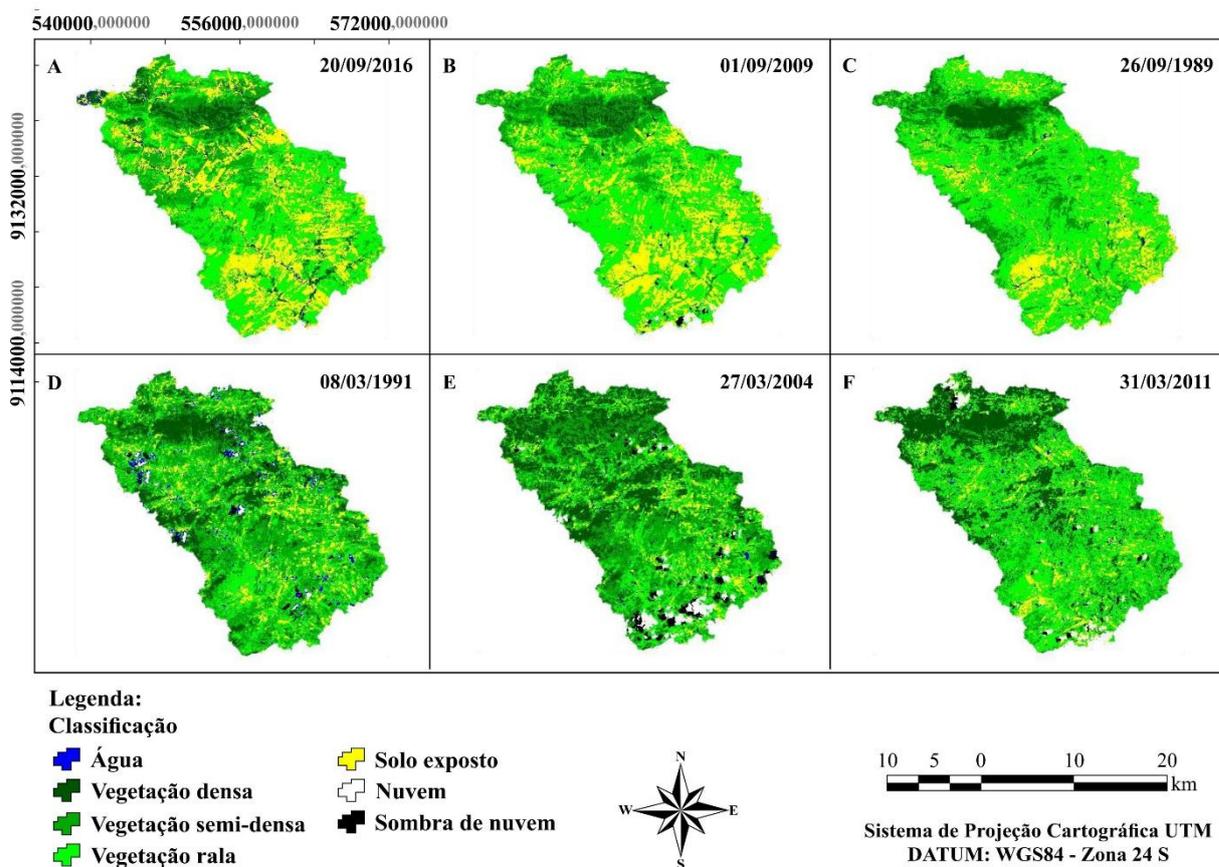
2013). As características físico-hídricas da bacia hidrográfica do riacho Exu estão mencionadas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Características físico-hídricas da bacia hidrográfica do riacho Exu.

Características	Valor
Área de drenagem	537,43 km <sup>2</sup>
Perímetro	125 km
Comprimento do curso de água	40 km
Cota máxima	625 m
Cota mínima	587 m
Declividade média da bacia	0,095 m m <sup>-1</sup>

**Fonte:** Adaptado de Braga Júnior (2015).

O mapa espacial uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica foi classificada para os dias 26/09/1986, 08/03/1991, 27/03/2004, 01/09/2009, 31/03/2011 e 20/09/2016 utilizando o método da máxima verossimilhança apresentado na Figura 2.



**Figura 2.** Classificação do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do riacho Exu.

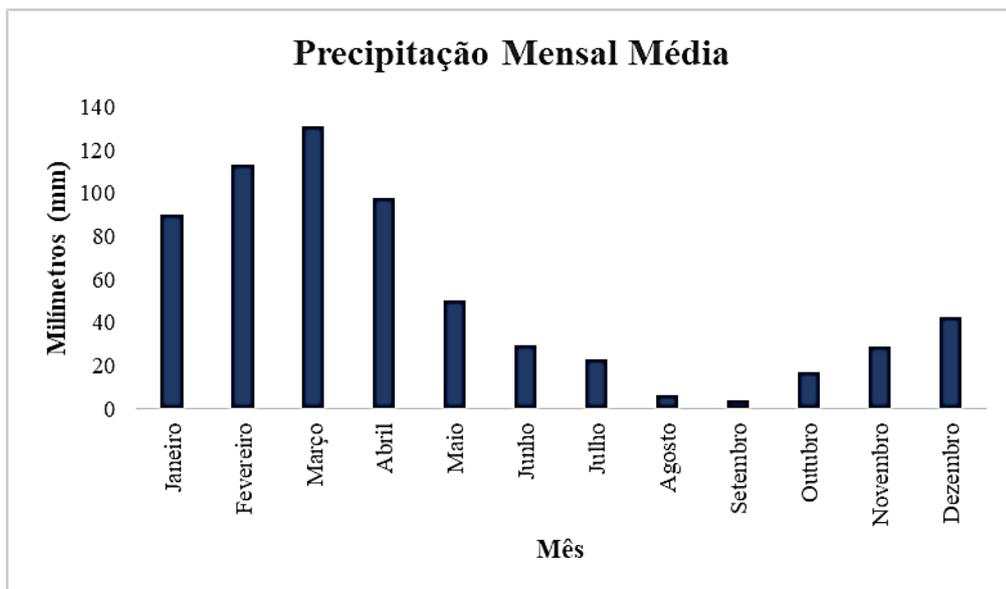
## 4.2 Dados meteorológicos

Foram adquiridos dados de temperatura média do ar instantânea ( $T_a$ , °C), umidade relativa do ar instantânea (UR, %), pressão atmosférica do ar instantânea, ( $P_o$ , kPa) junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) registrados automaticamente na Plataforma de Coleta de Dados (PCD) 32285 - Estação: Serra Talhada-PE, Latitude 7°55'30" S, Longitude 38° 17' 13" W, Altitude: 430m. Esses dados estão disponíveis a partir do ano de 1999 até o presente. Os dados de superfície foram necessários para realizar as correções e calibrações das imagens obtidas do *Landsat 5 TM*, e *Landsat 8 OLI/TIRS* conforme a Tabela 3. Para as imagens com data anterior a 1999 foram feitas estimativas dos dados de superfície onde foi utilizado a média dos dados ( $T_{ar}$  e UR) de 2000 a 2016 no horário da passagem do satélite para o período seco (setembro) e para o período chuvoso (março).

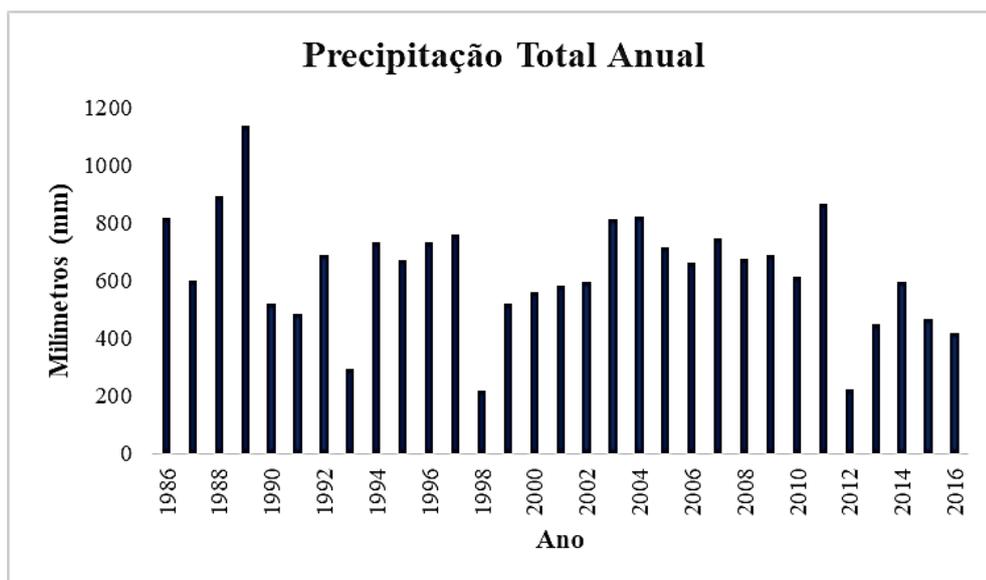
**Tabela 3.** Dados de entrada e variáveis no momento da passagem do satélite.

<b>Data</b>	<b>Horário</b>	<b><math>T_{ar}</math> (°C)</b>	<b>UR (%)</b>	<b><math>P_o</math> (kPa)</b>
26/09/1986	09h07min	26	60	96,4
08/03/1991	09h02min	25,5	74	96,4
27/03/2004	09h20min	26,5	98	96,4
01/09/2009	09h31min	25	52	96,4
31/03/2011	09h31min	25,6	69	96
20/09/2016	09h41min	27,3	41	95,9

Também se adquiriu dados de precipitação de janeiro de 1986 a dezembro de 2016 foram registrados pela a APAC – (Agência Pernambucana de Águas e Clima), na estação denominada Posto 13, os dados com falhas foram corrigidos utilizando regressão linear, combinado com dados de estações próximas localizadas em Serra Talhada. É possível observar nas Figuras 3 e 4 a precipitação média mensal e a precipitação total anual respectivamente para a série dos 31 anos em estudo.



**Figura 3.** Gráfico da precipitação mensal média da série histórica.



**Figura 4.** Gráfico de precipitação total anual da série histórica.

### 4.3 Técnica dos quantis

A técnica dos quantis aqui empregada é uma metodologia que consiste estritamente na distribuição em ordenamento crescente de uma série amostral contínua, neste caso, o conjunto de dados anuais de chuva para um período de trinta e um anos, para o qual atribui-se uma probabilidade  $p$  para cada valor amostral (XAVIER, 1999; XAVIER et al., 2002). Assim, a série temporal pode ser distribuída da seguinte forma:  $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ , onde  $x_1$  representa o menor valor e  $x_n$  o maior valor da série. O índice  $n$ , portanto, constitui o tamanho da amostra

Aplicou-se a técnica dos quantis para a escala temporal anual com a utilização do software Excel. Este trabalho adotou as ordens quantílicas  $p = 0,33; 0,66$  com a finalidade de classificar os anos de acordo com a precipitação total anual em Seco, Normal e Chuvoso. Para determinação do intervalo de classe dividiu-se a amplitude (maior precipitação anual menos a menor precipitação anual da série histórica) pelo número de classes (três) para estabelecer as classes com relação aos valores observados de precipitação total anual de acordo com a Tabela 4.

**Tabela 4.** Intervalos de classe para classificação da precipitação anual.

Classes de Precipitação		
Seco	Quando	$x_i \leq q_{0,33}$
Normal	Quando	$q_{0,33} < x_i < q_{0,66}$
Chuvoso	Quando	$x_i \geq q_{0,66}$

**Fonte:** Próprio autor.

#### 4.4 Índice de Anomalia de Chuva (IAC)

A precipitação pluviométrica é um dos indicadores de suscetibilidade para locais em processo de desertificação. O IAC é uma técnica utilizada para caracterizar e monitorar a variabilidade espaço-temporal pluviométrica de uma região, revelando-se eficaz para locais semiáridos como ocorrem no Nordeste brasileiro, além de permitir a “comparação das condições atuais de precipitação em relação aos valores históricos, servindo ainda para avaliar a distribuição espacial do evento, consoante sua intensidade” (DA SILVA et al., 2011), bem como a variação multidecadal. De acordo com Rooy (1965), a base de cálculo do IAC anual é relativamente simples e eficaz, sendo possível comparar o desvio da precipitação em relação à condição normal de diversas regiões por meio das equações 1 e 2.

$$IAC = 3 \frac{P - P_{med}}{P_{max} - P_{med}} \quad (1)$$

$$IAC = -3 \frac{P - P_{med}}{P_{min} - P_{med}} \quad (2)$$

Onde  $p$  é precipitação anual atual (mm),  $p_{med}$  é a precipitação média anual da série histórica (mm),  $p_{max}$  é a média das dez maiores precipitações anuais da série histórica (mm),  $p_{min}$  é a média das dez menores precipitações anuais da série histórica (mm), sendo as anomalias positivas os valores acima da média e as negativas aquelas que ficarem abaixo da média. A classificação dos anos secos e úmidos foi feito partir da Tabela 5.

**Tabela 5.** Classificação de Intensidade do Índice de Anomalias de Chuva

	<b>Faixa do IAC</b>	<b>Classe de Intensidade</b>
<b>Índice de Anomalia de Chuva (IAC)</b>	$\geq 4$	Extremamente Úmido
	2 a 4	Muito Úmido
	0 a 2	Úmido
	0 a -2	Seco
	-2 a -4	Muito Seco
	$\leq -4$	Extremamente Seco

**Fonte:** Adaptado de Araújo et al. (2009).

#### 4.5 Dados orbitais

A presente pesquisa foi realizada utilizando imagens dos satélites *Landsat 5 TM (Thematic Mapper)* e do *Landsat 8 OLI/TIRS (Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor)*, que foram adquiridas gratuitamente no website americano *United States Geological Survey - USGS* (<http://earthexplorer.usgs.gov>), mediante um cadastro previamente realizado no site. Para ser efetivado o download das imagens adotou-se os seguintes critérios:

1. Céu claro ou com menos de 10% de nuvens, pois a presença de nuvens pode alterar os valores das imagens para mais ou para menos;
2. Imagens datadas de anos classificados como Seco, Normal e Chuvoso de acordo a técnica dos quantis.
3. Imagens inseridas no mês mais seco e no mês mais chuvoso que foram setembro e março, respectivamente, de acordo com a precipitação mensal da série histórica;

Dessa forma, obteve-se seis imagens, três para setembro (mês mais seco) nos anos considerados Seco, Normal e Chuvoso e mais três para o mês de março (mais chuvoso) em anos Seco, Normal e Chuvoso. Cinco imagens do satélite *Landsat 5 TM* e uma imagem do *Landsat 8 OLI/TIRS* foram adquiridas.

As imagens adquiridas encontram-se ortorretificadas e foram georreferenciadas e possuem órbita 216, ponto 65, que cobrem a área de estudo. O sistema de projeção geográfica é UTM (*Universal Transverse Mercator*), DATUM: WGS 1984 na zona 24 Sul. Dados de dia sequencial do ano – DSA, elevação solar (E), ângulo zenital (Z), distância média sol-terra para do dia da imagem ( $d_r$ ), e transmissividade atmosférica instantânea no domínio da radiação solar para dias de céu claro ( $\tau_{sw}$ ) (Equação 16) das imagens estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6.** Dados orbitais das imagens no momento da passagem do satélite

<i>Landsat</i>	Data da imagem	DSA	E (graus)	Z (graus)	$d_r$	$\tau_{sw}$
5 TM	26/09/1989	269	55,220	34,780	0,997	0,737
5 TM	08/03/1991	67	49,767	40,233	1,013	0,720
5 TM	27/03/2004	87	54,111	35,889	1,002	0,710
5 TM	01/09/2009	244	55,873	34,127	0,983	0,745
5 TM	31/03/2011	90	56,511	33,489	1,001	0,733
8 OLI/TIRS	20/09/2016	264	62,665	27,335	0,994	0,758

As imagens do *Landsat 5* são compostas por 7 bandas espectrais e compreendem um comprimento de onda de 0,452-12,42  $\mu\text{m}$ , com valores de 0 a 256 (8 bits) e resolução espacial de 30 metros nas bandas de 1 a 5 e 7, tendo a banda termal 6 uma resolução de 120 metros. O *Landsat 8 OLI/TIRS* é composto por 11 bandas multiespectrais entre os comprimentos de onda 0,43-12,51  $\mu\text{m}$ . Não obstante, possuir resolução espectral de 12 bits, porém os arquivos GeoTIFFs (compactado) e TXT (metadados) são disponibilizados em 16 bits, fazendo com que haja um melhor detalhamento das imagens (SILVA, 2016).

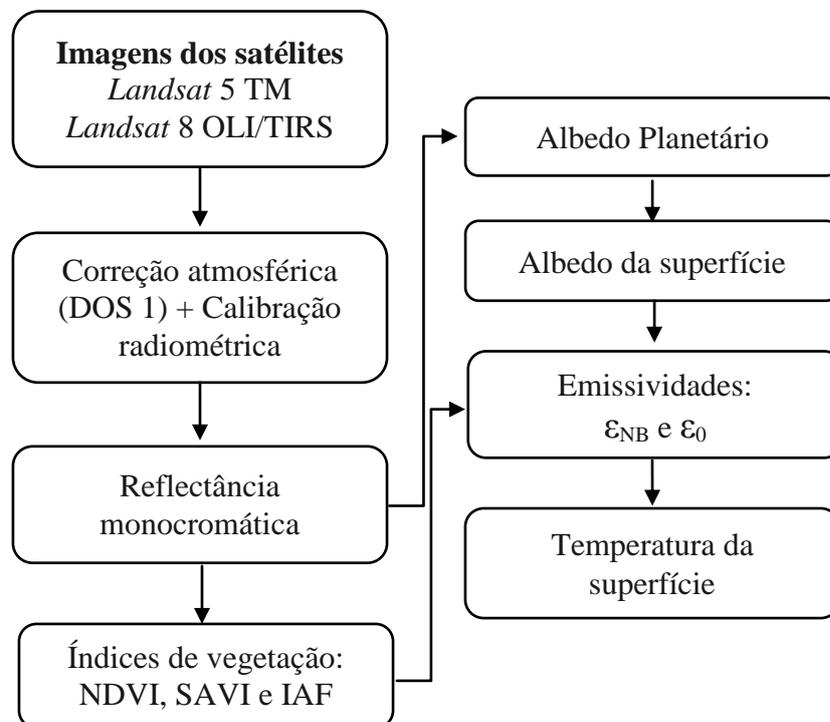
Com as imagens obtidas utilizou-se então o software QGIS 2.18.9, mais especificamente a ferramenta *Semi-Automatic Classification Plugin* para efetuar a correção atmosférica pelo método do pixel escuro conhecido como DOS 1 (*Dark Object Subtraction*), onde automaticamente através dos metadados das imagens foi também feito a calibração radiométrica tendo como produto a reflectância planetária (etapa 2) corrigida para cada banda espectral ( $r_b$ ). Após realizar a correção atmosférica utilizou-se o software ERDAS IMAGINE versão 9.1, Leica Geosystems para os seguintes processos: Empilhamento das bandas de 1 a 7 do *Landsat 5 TM* e da 2 a 7 e a banda termal 10 para o *Landsat 8 OLI/TIRS*, o recorte da área de estudo, reprojeção da imagem. Após os passos descritos, implementou-se na ferramenta MODEL MAKER do software ERDAS IMAGINE 9.1 o modelo do algoritmo SEBAL para processar os parâmetros biofísicos do albedo e temperatura da superfície e os índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF).

#### 4.6 Correção atmosférica e parâmetros biofísicos

O método de correção atmosférica DOS foi proposto por Chavez (1988), segundo esse método, em toda e qualquer cena e em qualquer banda espectral existem *pixels* que deveriam assumir o valor “0”. Seriam esses alvos escuros na imagem, em geral sombras de nuvens ou ocasionadas pela topografia, que deveriam apresentar um número digital muito baixo na imagem, equivalente a cerca de 1% de reflectância. Os valores excedentes deveriam ser explicados pela interferência aditiva do espalhamento atmosférico. A correção é feita segundo procedimento simples que tem como objetivo identificar, em cada banda espectral, quais quantidades de NDs (números digitais) ou FRB (fator de reflectância bidirecional) aparentes deveriam ser subtraídas de cada imagem como um todo (PONZONI, 2012). Mais detalhes desse método podem ser encontrados em Gürtler et al. (2005) e Sobrino et al. (2004).

O SEBAL tem sido utilizado em diferentes países e tem proporcionado resultados satisfatórios no sentido de análise do uso racional dos recursos naturais, manejo da irrigação e gerenciamento de recursos hídricos (BASTIAANSSEN, 2000; ALLEN et al., 2002).

Segue na Figura 5 o fluxograma com as etapas de processamento desde a correção atmosférica aos parâmetros biofísicos com utilização do modelo SEBAL até a temperatura da superfície.



**Figura 5.** Fluxograma das etapas de processamento dos parâmetros biofísicos.

## 4.6.1 Calibração radiométrica e radiância (ETAPA 1)

### 4.6.1.1 Landsat 5 TM

Para cômputo da radiância espectral em cada banda do *Landsat 5* na ferramenta *Semi-Automatic Classification Plugin* utiliza a Equação 3 a seguir de acordo com Chander et al. (2009).

$$L_b = L_{\min b} + \left( \frac{L_{\max b} - L_{\min b}}{255} \right) (ND_b - 1) \quad (3)$$

Em que,  $L_b$  ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ) é a radiância de cada pixel em cada banda;  $b$  (subscrito) representa cada uma das bandas do *Landsat 5 TM*;  $L_{\max b}$  e  $L_{\min b}$  são as radiâncias espectrais mínima e máxima ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ) respectivamente conforme a Tabela 7;  $ND$  é a intensidade do pixel (Número digital – número inteiro de 0 a 255, serão encontrados a partir da imagem a ser estudada).

**Tabela 7.** Descrição das bandas do Mapeador Temático (TM) do *Landsat 5*, com os coeficiente de calibração (Radiância mínima –  $L_{\min}$  e máxima –  $L_{\max}$  para o período: antes de maio/2003 ( $L_{\max 1}$ ), maio/2003 a abril/2007 ( $L_{\max 2}$ ) após abril/2007 ( $L_{\max 3}$ )) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (TOA).

Bandas	Comprimento de onda ( $\mu m$ )	Coeficiente de calibração do <i>Landsat 5</i> TM ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ )				Irradiância solar espectral no topo da atmosfera - TOA ( $W m^{-2} \mu m^{-1}$ )
		$L_{\min}$	$L_{\max 1}$	$L_{\max 2}$	$L_{\max 3}$	
1 (Azul)	0,45 – 0,52	-1.52	152,10	193,0	169,0	1957
2 (Verde)	0,52 – 0,60	-2.84	296,81	365,0	333,0	1796
3 (Vermelho)	0,63 – 0,69	-1.17	204,30	264,0	264,0	1536
4 (IV-Próximo)	0,76 – 0,90	-1.51	206,20	221,0	221,0	1031
5 (IV-Médio)	1,55 – 1,75	-0.37	27,19	30,2	30,2	220,0
6 (IV-Termal)	10,4 – 12,5	1.2378	15,303	15,303	15,303	-
7 (IV-Médio)	2,08 – 2,35	-0.15	14,38	16,5	16,0	83,44

#### 4.6.1.2 Landsat 8 OLI/TIRS

A calibração foi determinada com base nos coeficientes dos termos aditivo e multiplicativo, disponibilizados no metadados da imagem, para converter os valores do nível de cinza de cada banda em radiancia espectral, utilizando os coeficientes referentes a radiância. Dessa forma para determinação da radiância espectral em cada banda utiliza-se a Equação 4:

$$L_b = \text{Add}_{\text{rad } b} + \text{Mult}_{\text{rad } b} \cdot \text{ND}_b$$

Em que,  $\text{Add}_{\text{rad } b}$  é o termo aditivo e o  $\text{Mult}_{\text{rad } b}$  é o termo multiplicativo, todos referentes à radiancia e  $\text{ND}_b$  é a magnitude de cada pixel para banda “b” em questão.

#### 4.6.2 Reflectância monocromática (ETAPA 2)

Para o cálculo da reflectância foi necessário calcular a *distância relativa Terra-Sol* ( $d_r$ ), conforme a Equação 5 (IQBAL, 1983):

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{\text{DSA} \cdot 2 \cdot \pi}{365,25}\right) \quad (5)$$

Em que, DSA é o dia sequencial do ano e o argumento da função cos (cosseno) está em radianos.

##### 4.6.2.1 Landsat 5 TM

A reflectância do mesmo pixel da imagem considerada na etapa anterior foi determinada em função do ângulo zenital solar e da distância relativa Terra-Sol para cada banda do satélite *Landsat 5 TM* (CHANDER et al., 2009) representado pela Equação 6 a seguir:

$$r_b = \frac{\pi \cdot L_b}{k_b \cdot \text{Cos } Z \cdot d_r} \quad (6)$$

Em que,  $r_b$  ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ) é a reflectância monocromática de cada pixel em cada banda (b);  $k_b$  ( $W m^{-2} \mu m^{-1}$ ) é a constante solar associada a cada uma das bandas reflectivas do *Landsat 5 TM*, conforme empregada e proposta por Chander et al. (2009);  $Z$  é o ângulo zenital solar local ( $Z= 90^\circ - E$ );  $d_r$  é a distância relativa Terra-Sol.

#### 4.6.2.2 *Landsat 8 OLI/TIRS*

A reflectância planetária ( $r_b$ ) para imagem do *Landsat 8 OLI* é dada pela Equação 7, na qual será necessário transformar os valores quantizados e calibrados do nível de cinza de cada banda reflectiva “b” (2 a 7) do OLI, para reflectância.

$$r_b = \frac{(Add_{ref\ b} + Mult_{ref\ b} \cdot ND_b)}{\cos Z \cdot d_r} \quad (7)$$

Dessa forma tem-se os termos  $Add_{ref\ b}$  que é o termo aditivo e o  $Mult_{ref\ b}$  o multiplicativo relativos à reflectância extraídos do metadados de cada imagem, bem como o cosseno do ângulo zenital ( $Z$ ) que é encontrado a partir da elevação solar ( $E$ ) ( $Z= 90^\circ - E$ ).  $ND_b$  é a intensidade de cada pixel em cada banda.

#### 4.6.3 Albedo planetário (ETAPA 3)

O albedo no topo da Atmosfera ou albedo planetário ( $\alpha_{toa}$ ) representa a quantidade de radiação refletida de cada pixel sem correção atmosférica, que consiste em combinação linear da refletância espectral em cada uma das bandas reflectivas.

##### 4.6.3.1 *Landsat 5 TM*

O albedo planetário para as imagens do satélite *Landsat 5* foi estimado de acordo com Silva et al. (2005a), Bezerra et al. (2014) e Silva (2016) conforme Equação 8.

$$\alpha_{toa} = 0,293 \cdot r_1 + 0,274 \cdot r_2 + 0,233 \cdot r_3 + 0,157 \cdot r_4 + 0,033 \cdot r_5 + 0,011 \cdot r_7 \quad (8)$$

Os pesos da equação acima, correspondem ao valor da irradiância solar monocromática ( $k_b$ ) de cada banda (Tabela 7) pela somatória das irradiâncias de todas as bandas ( $\sum k_b$ ), ou seja: peso da banda  $b = k_b / \sum k_b$  (SILVA et al., 2005a; BEZERRA et al., 2014).

#### 4.6.3.2 Landsat 8 OLI/TIRS

Cômputos de pesos ( $k_b$ ) (Equação 9) para cada banda foram calculados para determinação de coeficientes de peso ( $p_b$ ) também para cada banda “b” (STARKS et al., 1991; RUHOFF et al., 2015; SILVA et al., 2016).

$$k_b = \frac{\pi \cdot L_b}{r_b \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (9)$$

Em que,  $k_b$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$ ) é a constante solar associada a cada uma das bandas reflectivas  $r_b$  de 2 a 7 do *Landsat 8 OLI* empregado no estudo. Os pesos para cada banda foram conforme os estudos de Silva et al. (2016) e Silva (2016), Equação 10.

$$p_b = \frac{k_b}{\sum k_b} \quad (10)$$

O albedo planetário ( $\alpha_{toa}$ ), consiste em uma combinação linear da refletância espectral em cada uma das bandas reflectivas ( $r_b$ ) da 2 a 7 para o *Landsat 8 OLI* seus respectivos pesos  $p_b$ , como mostra a Equação 11.

$$\alpha_{toa} = p_2 \times r_2 + p_3 \times r_3 + p_4 \times r_4 + p_5 \times r_5 + p_6 \times r_6 + p_7 \times r_7 \quad (11)$$

#### 4.6.4 Albedo da superfície (ETAPA 4)

Para chegar na determinação do albedo da superfície ( $\alpha$ ), antes foi necessário calcular uma série de variáveis como pressão de saturação do vapor d'água ( $e_s$ ) utilizado a Equação 12 (GARRISON & ADLER 1990).

$$e_s = 0,6108 \cdot \exp^{\frac{17,27 \cdot t}{237,3 + t}} \quad (12)$$

Em que,  $e_s$  é dado em kPa e  $t$  é a temperatura do ar em °C. Posteriormente calculou-se a pressão real de vapor d'água ( $e_a$ ) (Equação 13) que utiliza-se da  $e_s$  e da umidade relativa do ar instantânea (UR) (observada em estação meteorológica automática) e é um das variáveis utilizadas para o cálculo da água precipitável (W).

$$e_a = \frac{UR \cdot e_s}{100} \quad (13)$$

Sendo a água precipitável (W dada em mm) uma das variáveis utilizadas para determinação da transmissividade atmosférica ( $\tau_{sw}$ ) tem-se na equação (14):

$$W = 0,14 \cdot e_a \cdot P_o + 2,1 \quad (14)$$

Em que,  $P_o$  é a pressão atmosférica instantânea, kPa extraído de estação meteorológica automática. Caso ocorra uma eventual falta de dados de pressão atmosférica obtêm-se a mesma de acordo com ASCE-EWRI (2005) e Allen et al. (2002) conforme a Equação 15.

$$P_o = 101,3 \left( \frac{T_{ar} - 0,0065 \cdot Z}{T_{ar}} \right)^{5,26} \quad (15)$$

Com todas essas variáveis determinadas nesta 4ª etapa, calcula-se a última variável, antes de se chegar ao albedo da superfície, a transmissividade atmosférica ( $\tau_{sw}$ ) para dias de céu claro, dada na equação (16).

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \exp \left[ \frac{-0,00146 \cdot P_o}{K_t \cdot \cos Z} - 0,075 \left( \frac{W}{\cos Z} \right)^{0,4} \right] \quad (16)$$

Em que,  $K_t$  é o coeficiente de turbidez do ar ( $K_t = 1,0$  para ar limpo e  $K_t = 0,5$  para ar extremamente turbido ou poluído (ALLEN et al., 2002; 2007). Neste trabalho foi utilizado  $K_t = 1,0$  conforme pesquisas mais atuais (SILVA et al., 2016). Dessa forma, seguindo o mesmo padrão de literaturas como Bastiaanssen et al. (1998b) e Allen et al. (2002), o albedo da superfície ou albedo corrigido foi expresso pela Equação 17.

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{atm}}{\tau_{sw}^2} \quad (17)$$

Em que  $\alpha_{atm}$  é a reflectância da própria atmosfera, que varia entre 0,025 e 0,04 foi utilizado o valor de 0,03 como tem sido recomendado com base em estudos realizados por Bastiaanssen (2000), Silva et al. (2005b) e Silva et al. (2011).

#### 4.6.5 Índices de vegetação (ETAPA 5)

Nesta etapa foram estimados os índices de vegetação NDVI, SAVI, IAF para bacia hidrográfica do riacho Exu.

##### 4.6.5.1 NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)

Este parâmetro é um indicador da quantidade e da condição da vegetação verde, seus valores variam de -1 a +1, onde valores positivos são alcançados em área com algum tipo de vegetação, variando de acordo com a densidade de plantas na área. Para superfícies com água e nuvens o NDVI é menor que 0.

Segundo Allen et al. (2002), o NDVI é encontrado através da razão entre a diferença das refletividades das do infra-vermelho próximo ( $\rho_{iv}$ ) e do vermelho ( $\rho_v$ ), pela soma das mesmas conforme a Equação 18.

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (18)$$

Em que as refletividades do infravermelho próximo ( $\rho_{iv}$ ) e do vermelho ( $\rho_v$ ) correspondem respectivamente as bandas 3 e 4 do *Landsat 5 TM* e 5 e 4 do *Landsat 8 OLI*.

##### 4.6.5.2 SAVI e Índice de Área Foliar (IAF)

Para determinação do IAF, que é um indicador de biomassa de cada pixel da imagem, é necessário de antemão obter o parâmetro biofísico SAVI que é dado pela Equação 19 (ALLEN et al., 2002).

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (19)$$

Em que  $L$  é uma variável de valor 0,25 (usado para vegetação densa), 0,5 (usado para vegetação intermediária) e 1,0 (usado para pouca vegetação). O valor utilizado foi de 0,1 fazendo uma analogamente a estudos propostos por Allen et al. (2007) e Silva et al. (2011).

Estando o SAVI estimado pode-se então obter-se o IAF, utilizando a Equação 20, sugerida por Allen et al. (2002) que é definida pela razão entre a área foliar de toda vegetação por unidade de área do terreno utilizada por essa vegetação dada em  $m^2.m^{-2}$ .

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (20)$$

#### 4.6.6 Emissividades (ETAPA 6)

A equação de Planck invertida, válida para um corpo negro, foi utilizada para obtenção da temperatura da superfície (etapa 7). Não existindo a emissividade de radiação eletromagnética de cada pixel ao contrário de um corpo negro, existe a necessidade de introduzir a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal  $\epsilon_{NB}$  (10,4 – 12,5  $\mu m$ ). Dessa forma, o cômputo da radiação de onda longa emitida por cada pixel, foi considerada a emissividade no domínio da banda larga  $\epsilon_0$  (5 – 100  $\mu m$ ).

As emissividades de cada pixel ( $\epsilon_{NB}$ ) e a ( $\epsilon_0$ ), podem ser obtidas e validadas, para  $NDVI > 0$  e  $IAF < 3$ , segundo as equações 21 e 22 conforme Allen et al. (2002).

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 \cdot IAF \quad (21)$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 \cdot IAF \quad (22)$$

Foram seguidas as seguintes condições, para pixels com valores de  $IAF \geq 3$ , considera-se  $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$ . Para  $NDVI < 0$ ,  $\epsilon_{NB} = 0,99$  e  $\epsilon_0 = 0,985$  (ALLEN et al., 2002).

#### 4.6.7 Temperatura da superfície (ETAPA 7)

Para a obtenção deste parâmetro foi utilizado a radiância espectral das bandas termais  $L_{b6}$  do *Landsat 5 TM*  $L_{b10}$  do *Landsat 8 TIRS* e a emissividade  $\epsilon_{NB}$  obtida na etapa anterior. Assim, dada a Equação 21, será determinada a temperatura da superfície em Kelvin (ALLEN et al., 2002).

$$T_s = \frac{K_2}{\left(\frac{\epsilon_{NB} \cdot K_1}{L_b} + 1\right)} \quad (21)$$

Logo,  $K_1$  e  $K_2$  ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ) são constantes de calibração das bandas termais do *Landsat 5 TM* (banda termal 6,  $L_{b6}$ ,  $K_1 = 607,76$  e  $K_2 = 1260,56 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ) e do *Landsat 8 TIRS* (banda termal 10,  $L_{b10}$ ,  $K_1 = 774,89$  e  $K_2 = 1321,08 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ), retirados do metadados das imagens em estudo.

#### 4.7 Análise estatística

Os métodos apresentados na determinação dos parâmetros biofísicos serão analisados segundo estatística descritiva dos principais parâmetros estatísticos (média, máximo, mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Técnica dos quantis

A Tabela 8 apresenta a determinação das classes, probabilidades e intervalo médio da precipitação anual relacionada com as ordens quantílicas.

**Tabela 8.** Determinação das classes e intervalo médio da precipitação anual relacionada com as ordens quantílicas.

Classes	Quantis	Intervalo médio de precipitação (mm)	
		Mínimo	Máximo
Seco	$P < Q_{0,33}$	217,4	524,9
Normal	$Q_{0,33} \leq Q_{0,66}$	525	832,5
Chuvoso	$P > Q_{0,66}$	832,6	1140

A precipitação anual para bacia hidrográfica do riacho Exu em Serra Talhada-PE nos anos avaliados pela técnica dos Quantis, variou de 217,4 mm (menor precipitação registrada) em 1998 e 1140 mm (maior precipitação registrada) em 1989. Dos 31 anos avaliados apenas três enquadraram-se como “Chuvoso” foram eles os anos de 1988, 1989 e 2011, com precipitações anuais de 892,7, 1140 e 866,4 mm respectivamente. Os anos classificados como “Normal” ocorreram 19 vezes e possuíram uma média de 688,7 mm o que denota uma precipitação dentro dos padrões para região. Os 9 anos restantes foram classificados como “Seco”, foram eles os anos de 1990, 1991, 1993, 1998, 1999, 2012, 2013, 2015 e 2016 e tiveram uma precipitação média de 400 mm. Outro resultado que mostra uma relevante variabilidade interanual das chuvas no semiárido está em 2011 e 2012, o primeiro possuiu uma classificação “Chuvoso” enquanto o segundo “Seco”. A Classificação completa do perfil histórico da precipitação de acordo com a técnica dos Quantis para bacia hidrográfica do riacho Exu pode ser observada na Tabela 9.

**Tabela 9.** Classificação do perfil histórico da precipitação de acordo com a técnica dos Quantis para bacia hidrográfica do riacho Exu no município de Serra Talhada no período de 1986 a 2016.

Seco		Normal		Chuvoso	
Ano	Precipitação	Ano	Precipitação	Ano	Precipitação
1990	519,75	1986	818,57	1988	892,69
1991	486,75	1987	599	1989	1140,02
1993	295,7	1992	690,8	2011	866,4
1998	217,4	1994	734		
1999	520,9	1995	673,45		
2012	224,4	1996	734,3		
2013	450,4	1997	758,8		
2015	466,6	2000	559		
2016	418,5	2001	583		
		2002	598,4		
		2003	814,73		
		2004	823,9		
		2005	715,2		
		2006	661,1		
		2007	747,6		
		2008	675,6		
		2009	688,3		
		2010	612,9		
		2014	596,6		
Média	400		688,70		966,37
Desvio Padrão	114,9188106		82,95908632		123,2572727
CV %	28,72651081		12,04579691		12,75466671

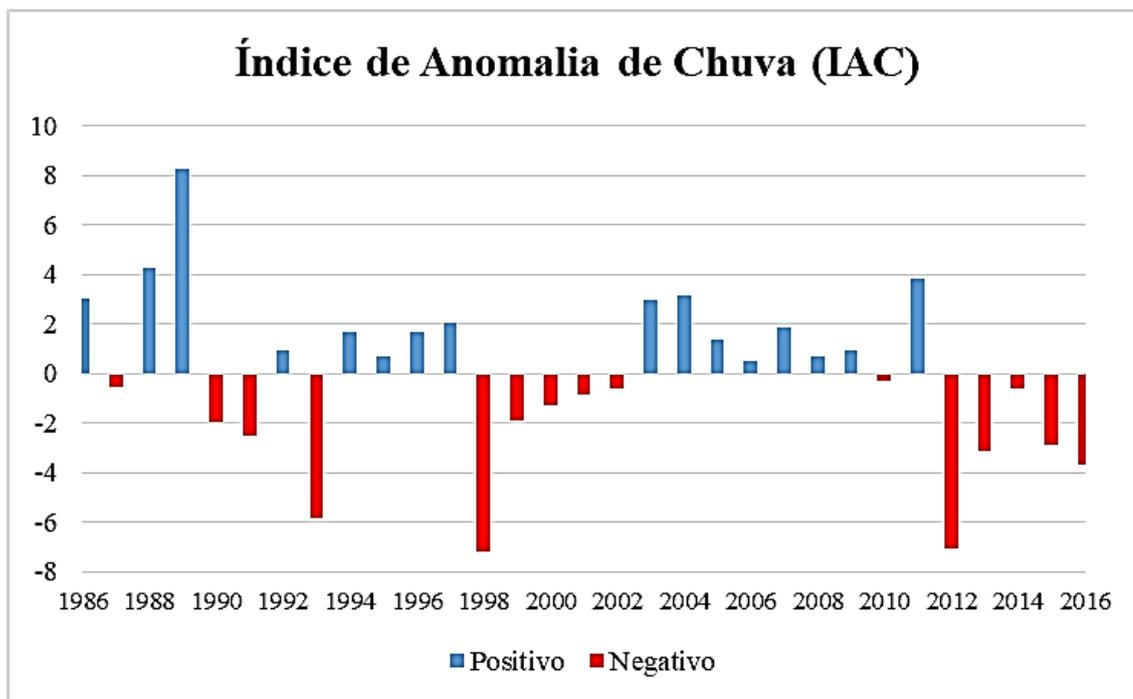
O ano de 1998, ano de ocorrência de El niño, apresentou a menor precipitação, assim como no trabalho de Duarte et al. (2015) para o município de Ipojuca-PE, logo para o ano de 2004 os autores obtiveram esse ano como um ano Extremamente Chuvoso para sua região de estudo em Pernambuco, apesar da diferença entre as regiões e do ano 2004 ter sido classificado como “Normal” no presente estudo, ele foi o ano mais chuvoso dentre os de sua classe. Estudos em Petrolina-PE obtiveram nos anos de 1989 e 2004 classificados como Muito Chuvosos, e os anos de 1993 e 2012 classificados como Muito Secos (LOPES et al., 2015), corroborando em partes com o este trabalho, logo 1993 e 2012 foram classificados como anos “Seco” e 1989 como “Chuvoso”.

Utilizando a técnica dos Quantis, Farias et al. (2012) destacaram a ocorrência de eventos extremamente secos e chuvosos em três pontos localizados na mesorregião do Sertão de Pernambuco, três deles apresentaram um predomínio de eventos extremamente secos, em

relação aos chuvosos, com 52 ocorrências de eventos secos e 35 ocorrências para os chuvosos, para uma série de dados de 1979 a 2010.

## 5.2 Índice de Anomalia de Chuva

Nos dados avaliados utilizando o Índice de Anomalias de Chuvas (Figura 6) para a bacia hidrográfica do riacho Exu no município de Serra Talhada foi constatado 16 anos com índices positivos variando de 0,47 a 8,24 e 15 anos com desvios negativos variando de -0,32 a -7,17. Os anos de 1988 e 1989 foram classificados como “Extremamente Úmido”, esses dois anos tiveram forte influência do fenômeno La niña. Em pesquisa realizada na bacia hidrográfica do Alto Ipanema, a qual abrange parte dos municípios de Arcoverde e Pesqueira, sertão de Pernambuco, Oliveira (2017) também obteve o ano de 1989 como um ano “Extremamente Úmido” com um valor de 4,34. Além dos dois anos classificados como “Extremamente Úmido” outros cinco anos foram classificados como “Muito Úmido”, foram eles: 1986, 1997, 2003, 2004 e 2011. Completando os índices positivos obteve-se nove anos classificados como “Úmido” variando entre valores de 0 a 2.



**Figura 6.** Índice de Anomalia de Chuva para bacia hidrográfica do riacho Exu, Serra Talhada-PE.

Em trabalho anterior utilizando uma série histórica que vai de 1950 a 2009, Nóbrega e Santiago (2014) citam que Serra Talhada teve seus níveis de precipitação alterados pela ocorrência de El Niño forte em 1993 e 1998 (OLIVEIRA, 2017), corroborando com atual trabalho, mesmo em uma série de dados históricos distintas, num ano “Extremamente Seco”, os anos de 1993 e 1998 tiveram valores de -5,8 e -7,17 respectivamente, além destes o ano de 2012 também foi classificado em “Extremamente Seco” com valores de -7,05 para esse estudo. Sousa et al. (2013), em trabalho na bacia do rio Jaguaribe, Ceará, utilizaram uma série de dados históricos de precipitação de 1921 a 2010 e detectaram que a predominância de anos secos ocorre em toda bacia do rio Jaguaribe assemelhando-se com este estudo. A classificação do IAC também pode ser observada na Tabela 10.

**Tabela 10.** Classificação do Índice de Anomalia de Chuva para bacia hidrográfica do riacho Exu.

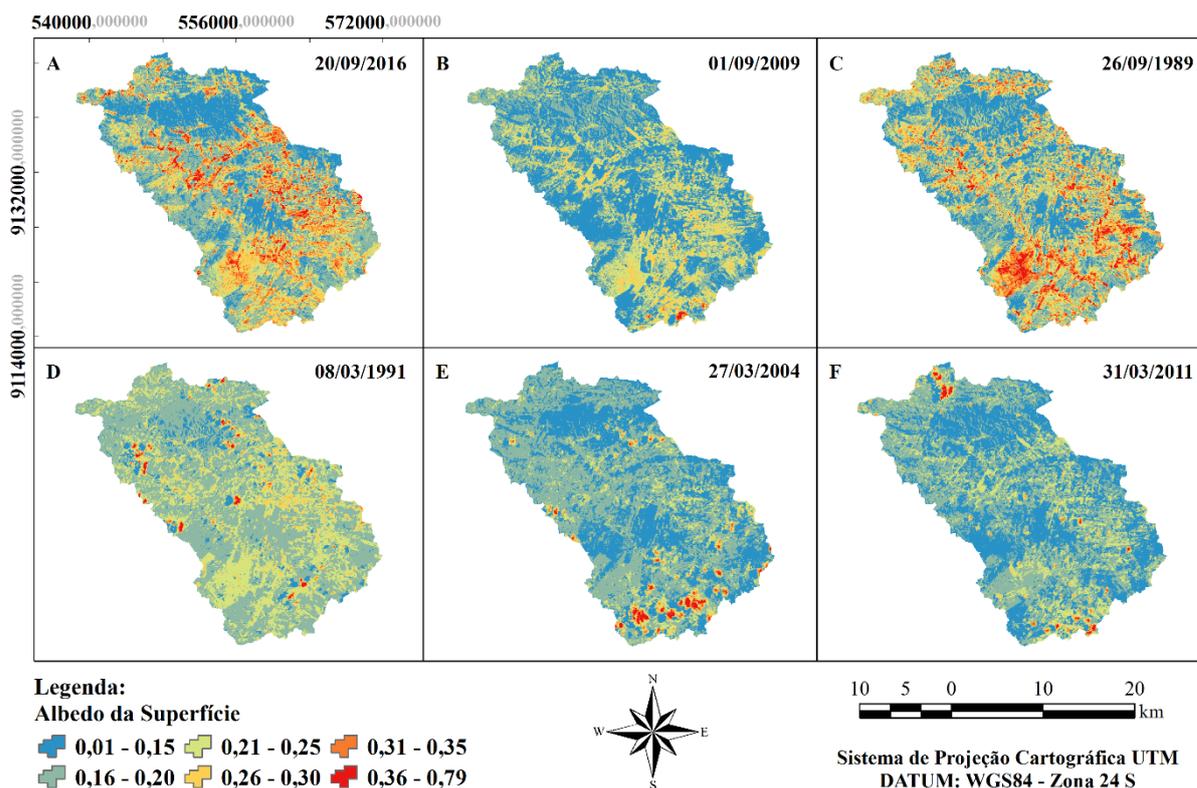
Ano	Valor	Classificação	Ano	Valor	Classificação
1986	3,03	Muito úmido	2002	-0,57	Seco
1987	-0,56	Seco	2003	2,96	Muito úmido
1988	4,23	Extremamente úmido	2004	3,11	Muito úmido
1989	8,24	Extremamente úmido	2005	1,35	Úmido
1990	-1,93	Seco	2006	0,47	Úmido
1991	-2,51	Muito seco	2007	1,87	Úmido
1992	0,95	Úmido	2008	0,71	Úmido
1993	-5,81	Extremamente seco	2009	0,91	Úmido
1994	1,65	Úmido	2010	-0,32	Seco
1995	0,67	Úmido	2011	3,80	Muito úmido
1996	1,66	Úmido	2012	-7,05	Extremamente seco
1997	2,06	Muito úmido	2013	-3,14	Muito seco
1998	-7,17	Extremamente seco	2014	-0,60	Seco
1999	-1,91	Seco	2015	-2,85	Muito seco
2000	-1,25	Seco	2016	-3,69	Muito seco
2001	-0,84	Seco			

### 5.3 Parâmetros biofísicos

#### 5.3.1 Albedo da superfície

A Figura 7 apresenta os mapas que representam o albedo da superfície ( $\alpha_{sup}$ ) da bacia hidrográfica do riacho Exu, onde as Figuras 7A, 7B e 7C representam o albedo da superfície para período seco em anos Seco, Normal e Chuvoso respectivamente. As Figuras 7D, 7E e 7F

representam o albedo da superfície para período chuvoso em anos classificados como Seco, Normal e Chuvoso respectivamente. As cores em tons azuis remetem os menores valores de albedo e que ocorrem em maior parte em vegetação mais densa (azul escuro), valores intermediários sendo representado pelas cores verde claro a amarelo e valores maiores sendo representados pelas cores laranja e vermelho.



**Figura 7.** Cartas temáticas do albedo da superfície para bacia hidrográfica do riacho Exu em anos Seco Normal e Chuvoso para os períodos seco 20/09/2016 (A), 01/09/2009 (B) e 26/09/1989 (C) e chuvoso 08/03/1991 (D), 27/03/2004 (E) e 31/03/2011 (F).

Observou-se que as imagens selecionadas para representar o período seco apresentaram uma supremacia em sua coloração apresentando mais pixels em tons verde claro, amarelo, laranja e vermelho que indicam maiores valores de albedo em relação as imagens que representam o período chuvoso, porém são as imagens do período chuvoso que apresentam maiores médias, principalmente, as Figuras 7E e 7F onde há presença de nuvens e que possivelmente acarretaram numa superestimação dos valores médios do albedo por possuírem valores extremamente altos. Os valores máximos de albedo estão contidos nas nuvens, onde é possível observar valores extremamente altos em nuvens que aparecem ao sul da Figura 7B, em pequenos pontos vermelhos espalhado entre a faixa norte e central na Figura 7D onde também é possível observar a sombra de algumas dessas nuvens apresentando valores baixos

do albedo. Nas Figuras 7E na parte sul e 7F na parte norte é possível observar pontos vermelhos indicando presença de nuvens.

Para as imagens do período seco o albedo da superfície variou de 0,01 a 0,79. Valores superiores a 0,31 representado na cor laranja foram observados em superfície pouco vegetada tal como valores superiores a 0,36 representado pela cor vermelha foi detectado em solos expostos e topo de nuvens, mostrando coerência com o trabalho de Dantas et al. (2010) que encontraram valores superiores a 34%, indicando solo pouco vegetado e topo de nuvens ao utilizarem imagens dos sensores TM *Landsat 5* e do AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) do NOAA para estimar o albedo da superfície em uma área ao leste do Ceará, nas proximidades do município de Quixeré em superfícies ocupadas por agricultura irrigada e áreas de vegetação nativa, os autores também detectaram que os maiores valores de albedo ocorreram nos meses de agosto e outubro de 2005 e os relacionaram como causa a estiagem neste período, a estiagem também foi relacionada como fator principal para maiores valores de albedo no presente trabalho.

Os parâmetros estatísticos, Tabela 11, apresentaram valores do DP (desvio padrão) que variam de 0,03 a 0,09 e CV (coeficiente de variação) variando de 0,09 a 0,50. A imagem do dia 31/03/2011 (Figura 7F) que representa o período chuvoso de um ano chuvoso foi que apresentou uma menor variabilidade espacial, as imagens do dia 20/09/2016 (Figura 7A) e 08/03/1991 (Figura 7D), representando os períodos chuvoso e seco para anos “Seco” respectivamente, apresentaram a maior variabilidade espacial.

**Tabela 11.** Parâmetros estatísticos do albedo da superfície para bacia hidrográfica do riacho Exu.

Datas	Albedo da Superfície				
	Mínimo	Máximo	Médio	DP	CV
26/09/1989	0,02	0,30	0,08	0,03	0,40
01/09/2009	0,04	0,79	0,15	0,03	0,20
20/09/2016	0,01	0,47	0,10	0,05	0,50
08/03/1991	0,01	0,70	0,12	0,06	0,50
27/03/2004	0,06	0,75	0,22	0,09	0,41
31/03/2011	0,05	0,50	0,19	0,05	0,09

Em trabalho realizado por Alves et al. (2017) utilizando imagem do *Landsat 8 OLI* também da data 20/09/2016 em três pontos representativos inseridos na bacia hidrográfica do

rio Pajeú, onde o ponto “A” equivalente a Serra do Arapuá apresentou valor de 15,50%, o ponto “B” equivalente ao Açude Serrinha apresentou valor de 7,20% e o ponto “C” representando área urbana de Serra Talhada foi encontrado o valor 30% de albedo da superfície, valores próximos para pontos similares na bacia em estudo nesta mesma data foram encontrados.

Também utilizando imagens *Landsat* 8 OLI, Silva et al. (2016) encontraram albedo em áreas agrícolas com valores entre 15 e 20% e nos corpos hídricos entre 3 e 8%, assemelhando-se ao presente estudo, porém em alguns trechos do decorrer do riacho é possível observar valores superiores a 15% principalmente nas imagens decorrentes do mês de setembro que equivale ao período seco, o que remete a uma grande possibilidade do solo está tomado por vegetação pouco densa ou parcialmente exposto isso pode ocorrer pelo fato do riacho estar seco e/ou assoreado.

Lins et al. (2017) ao utilizarem duas imagens do *Landsat* OLI para Arcoverde, sertão de Pernambuco, datadas do início do período chuvoso (14/01/2015) e final do período seco (02/12/2016) encontraram valores médios de 0,2 e 0,23 respectivamente, e consideraram que no curto intervalo temporal entre as duas imagens houve pouca variação do albedo da superfície em relação às alterações dos distintos usos do solo, diferentemente deste estudo onde o intervalo temporal entre as imagens estudadas foi superior e apresentaram médias variando entre 0,08 e 0,22.

Rodrigues et al. (2009) obtiveram valores oscilando de 0,26 a 0,36 de albedo da superfície em solo exposto e a cobertura vegetal de Caatinga apresentou valores de 0,10 a 0,15, bem como Bezerra et al. (2014), que ao estudarem os parâmetros biofísicos no Parque Nacional da Fuma Feia (PNFF) e seu entorno, região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, através de imagens do *Landsat* 5 TM, encontraram, de forma geral, as áreas com cobertura vegetal de Caatinga apresentando albedo também no intervalo de 0,10 a 0,15 corroborando com o presente estudo.

### 5.3.2 NDVI

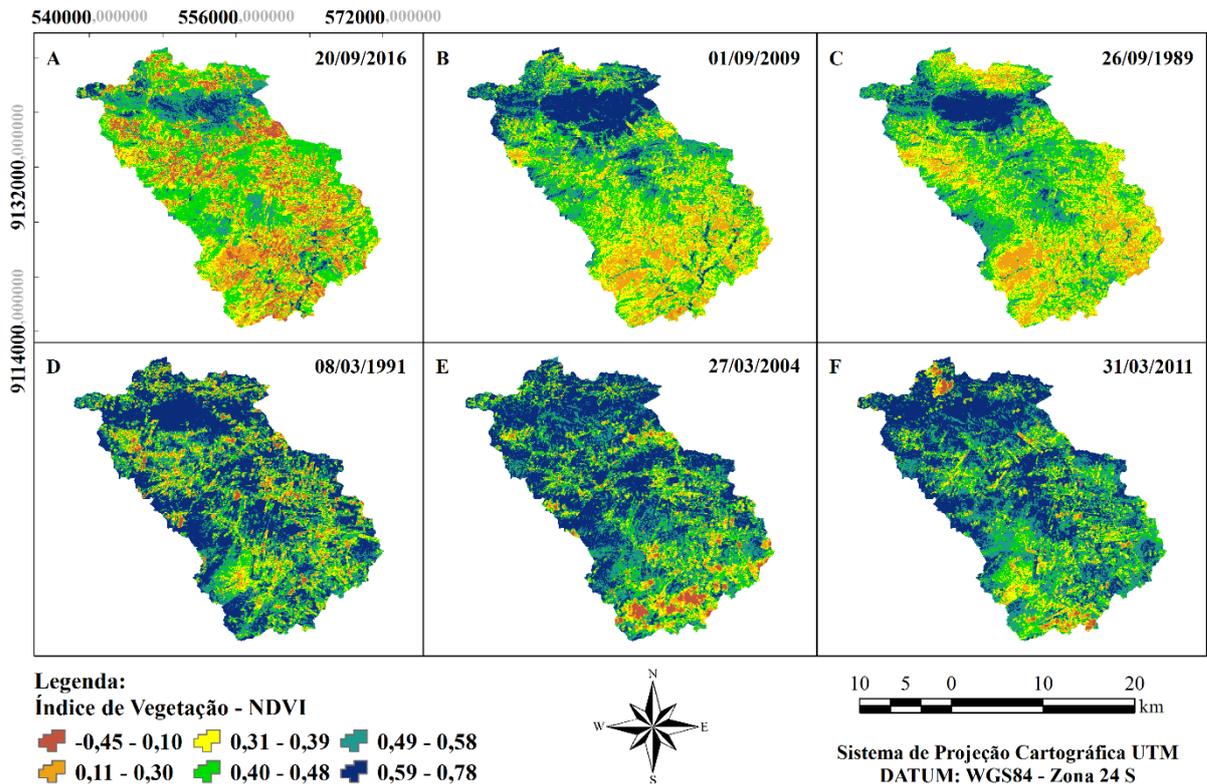
Os índices de vegetação NDVI para bacia hidrográfica do riacho Exu apresentam-se na carta temática da Figura 8 para os dias 20/09/2016 (A), 01/09/2009 (B) e 26/09/1989 (C) representando o período seco e para o período chuvoso os dias 08/03/1991 (D), 27/03/2004 (E) e 31/03/2011 (F) de anos Seco, Normal e Chuvoso, respectivamente.

De acordo com a carta temática do NDVI é possível observar que os tons de cores avermelhadas e alaranjadas para valores menores de NDVI estão relacionados as áreas de solo exposto, topos de nuvens e corpos hídricos; cores em tons amarelo e verde indicando valores intermediários podem ser relacionados para áreas de caatinga com vegetação menos vigorosa e para os tons azul e azul escuro é possível observar áreas com vegetação mais densa e vigorosa. Para as imagens do período seco os valores mínimo e máximo do NDVI variaram de -0,63 a 0,86, para as imagens do período chuvoso variaram de -0,49 a 0,91.

Os valores médios de NDVI apresentaram-se superiores nas imagens do período chuvoso, independentemente se o ano foi Seco, Normal ou Chuvoso. As imagens dos dias 20/09/2016 (A), 01/09/2009 (B) e 26/09/1989 (C) obtiveram valores médios de 0,37, 0,44 e 0,46 respectivamente, apesar da pouca diferença entre eles a imagem para o ano chuvoso foi a que apresentou maior média. Os dias 08/03/1991 (D), 27/03/2004 (E) e 31/03/2011 (F) apresentaram respectivamente valores médios de 0,68, 0,60 e 0,59. A presença de nuvens mesmo que em poucas quantidades podem ter subestimado os valores médios para as Figuras 8 (E) e (F).

A precipitação tem fator fundamental no nível de vegetação, logo comparando os extremos, ou seja, a imagem do período seco no ano classificado como seco Figura 8A (20/09/2016) com a Figura 8F (31/03/2011) que equivale ao período chuvoso no ano classificado como chuvoso, onde a segunda apresentou um maior nível de vegetação, para os dois meses que antecederam as imagens tivemos uma precipitação acumulada de 3,5 mm, nos meses de julho e agosto de 2016 e 219 mm nos meses de janeiro e fevereiro de 1989. O que explica a superioridade do índice de vegetação para o período chuvoso, visto que a região semiárida analisada é caracterizada por vegetação de Caatinga, com isso vale ressaltar o seu poder de resiliência ligados aos eventos chuvosos, onde observa-se a imediata formação da biomassa e dossel foliar (ARRAES et al., 2012).

Em estudo também realizado em região semiárida, no Nordeste Brasileiro, analisando parâmetros biofísicos, em especial o NDVI, Arraes et al. (2012) observaram que diante dos meses chuvosos houve incremento no NDVI, corroborando com o presente estudo.



**Figura 8.** Cartas temáticas do NDVI para bacia hidrográfica do riacho Exu em anos Seco Normal e Chuvoso para os períodos seco 20/09/2016 (A), 01/09/2009 (B) e 26/09/1989 (C) e chuvoso 08/03/1991 (D), 27/03/2004 (E) e 31/03/2011 (F).

Em trabalho realizado por Rodrigues et al. (2009), na bacia hidrográfica do rio Trussu, região semiárida do Ceará nos anos de 2000 e 2001, encontraram valores de NDVI na ordem de 0,003 a 0,20, para o período de estiagem, no período de ocorrência de chuva variou de 0,003 a 0,76 com valores predominantes na classe de 0,20 a 0,39. Bezerra et al. (2014), encontrou valores da ordem de 0,10 a 0,26 no período seco, enquanto no período chuvoso valores variaram de 0,66 a 0,79. Assim como nos trabalhos de Rodrigues et al. (2009) e Bezerra et al. (2014), foi possível observar maiores valores de NDVI para imagens do período chuvoso corroborando com o presente estudo. Alves et al. (2017) encontraram valores de NDVI em três pontos na bacia do rio Pajeú, para mesma data da Figura 8A, os quais foram 0,538 para o ponto “A” Serra do Arapuá onde destaca que a vegetação nesse ponto varia de acordo com a altitude, encontrando espécies de cactos a árvores frutíferas, para o açude Serrinha (B) o valor de -0,295 foi obtido e para a área urbana de Serra Talhada o valor de 0,189 foi encontrado, valores próximos foram observados para pontos similares na bacia em estudo nesta mesma data.

Na Tabela 12, estão representados os parâmetros estatísticos onde observa-se que o desvio padrão (DP) variou de 0,08 (Figura 8A) a 0,15 (Figura 8D). O coeficiente de variação

(CV) apresentou valor mínimo de 0,17 denotando uma menor variabilidade espacial na Figura 8F (31/03/2011) que representa o período chuvoso de ano classificado como chuvoso, que também apresentou menor variabilidade para o albedo da superfície, e um valor máximo de 0,27 na Figura 8B (01/09/2009) que representa o período seco de ano classificado como normal.

**Tabela 12.** Parâmetros estatísticos do NDVI para bacia hidrográfica do riacho Exu.

Datas	NDVI				
	Mínimo	Máximo	Médio	DP	CV
26/09/1989	-0,45	0,84	0,46	0,11	0,24
01/09/2009	-0,45	0,78	0,44	0,12	0,27
20/09/2016	-0,63	0,86	0,37	0,08	0,22
08/03/1991	-0,49	0,91	0,68	0,15	0,22
27/03/2004	-0,34	0,79	0,60	0,13	0,22
31/03/2011	-0,36	0,79	0,59	0,10	0,17

Avaliando um pixel de mesma localização espacial para detecção de corpos hídricos no período chuvoso obteve-se para as imagens dos dias 08/03/1991 (Figura 8D), 27/03/2004 (Figura 8E) e 31/03/2011 (Figura 8F) os valores -0,037, 0,032 e 0,17 respectivamente. O valor elevado do pixel da Figura 8F indica que houve uma mudança da característica solo, logo há variabilidade temporal de aproximadamente sete anos entre a Figura 8E e a Figura 8F.

Silva et al. (2005b) encontraram para classe de água, valores entre -0,30 e 0,33, em áreas de solo exposto observaram resultados na ordem respectiva de 0,16 e 0,17 para os anos de 2000 e 2001, e em área de caatinga, foi de 0,15 e 0,16 assemelhando-se em partes com o presente trabalho, logo neste foram observados maiores valores para caatinga. Santos e Galvêncio (2013) constataram em áreas de vegetação densa, com predomínio da caatinga arbórea, valores que variam de 0,71 a 0,80 e em áreas com vegetação esparsa, com predominância de caatinga arbustiva, valores de NDVI entre 0,51 a 0,70 similarmente a este estudo.

Oliveira (2017) em estudo de bacia hidrográfica em região semiárida adotou os seguintes intervalos de classe para NDVI: -1 a 0 (Corpos Hídricos); 0 a 0,4 (Solo Exposto); 0,4 a 0,5 (Vegetação Rala); 0,5 a 0,6 (Vegetação Arbustiva); 0,6 a 1 (Vegetação Arbórea) e encontrou valores médios das cenas variando de 0,42 a 0,737, denotando coerência com o

presente estudo. Albuquerque et al. (2014) constataram que o NDVI apresentou valores variando entre 0,01 a 0,29 em áreas de solo exposto e vegetação esparsa; enquanto os intervalos entre 0,3 e 0,5 representam vegetação menos densa; e os maiores que 0,5 indicam que a vegetação apresenta um bom estado fenológico, sendo a vegetação densa representada pelo NDVI superior a 0,7, corroborando com este trabalho.

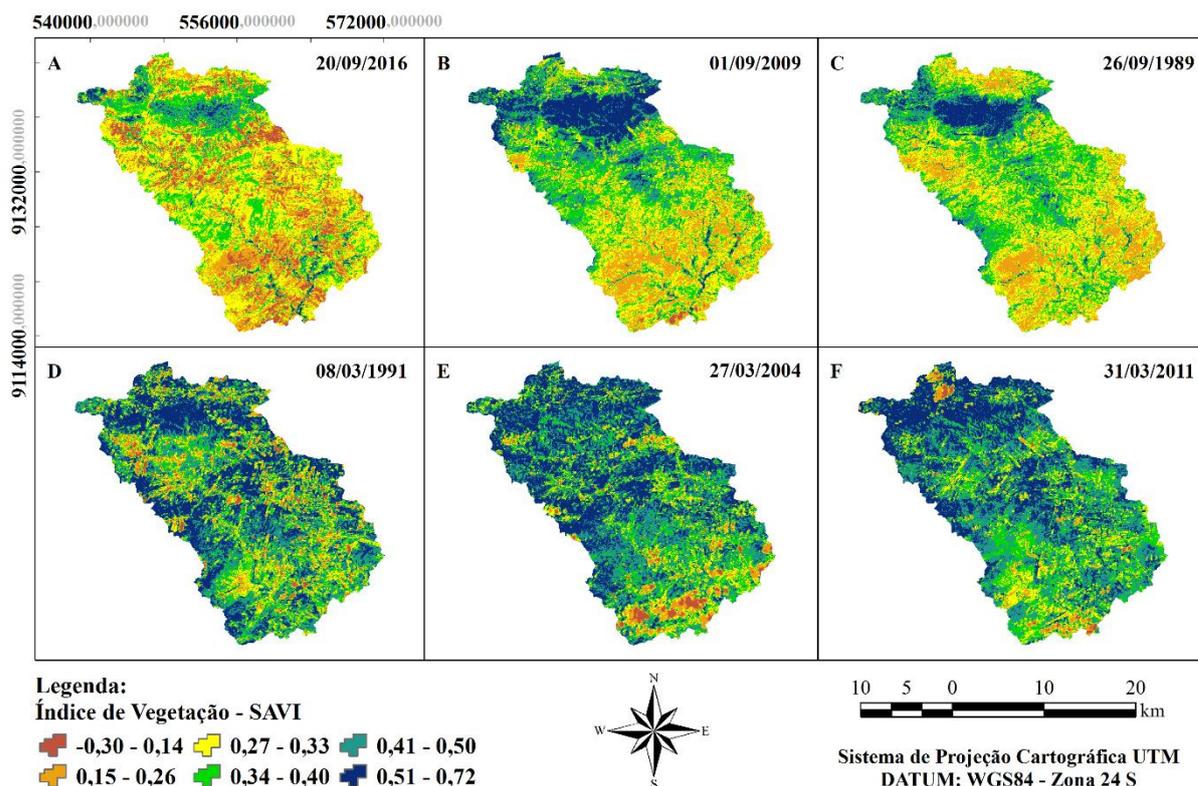
### 5.3.3 SAVI

O índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) das imagens estudadas estão representadas na Figura 9. As Figuras 9A, 9B e 9C representam o período seco para anos classificados como Seco, Normal e Chuvoso, respectivamente. É possível observar para essas imagens uma predominância de tons em cores mais quentes como vermelho, laranja e amarelo para valores que vão de -0,3 a 0,33 em comparação com as imagens da Figura 9D, 9E e 9F que representa o período chuvoso da mesma classificação dos anos citados acima, no qual apresentam maiores valores para esse parâmetro e são expostos em tons de cores mais frias que vão do verde, azul claro e azul escuro e variam de 0,34 a 0,72.

Os resultados obtidos para o SAVI se assemelham aos do NDVI tanto visualmente quanto em valores, logo o SAVI é um índice adaptado do NDVI onde há a inserção da constante L, utilizada para amenizar os efeitos “background” do solo. Essa semelhança é citada por diversos autores (RIBEIRO et al., 2016; SILVA, 2016; OLIVEIRA, 2017; SILVA, 2017). Os valores encontrados para o SAVI foram inferiores aos obtidos para o NDVI, diferentemente dos resultados obtidos por Rêgo et al. (2012), que ao estudar esses índices de vegetação para o município de São Domingos do Cariri-PB, encontram valores menores para NDVI em relação ao SAVI, remetendo a um comportamento diferente ao estimar índices de vegetação numa bacia hidrográfica e num município.

As médias encontradas variaram de 0,30 para a Figura 9A e 0,58 para Figura 9D, imagens referentes ao período seco de ano Seco e período chuvoso de ano Seco respectivamente. As imagens do período chuvoso apresentaram maiores médias, o que também foi averiguado para o NDVI, esse incremento é atribuído a precipitação. Em recorrência dos períodos chuvosos Ribeiro et al. (2016) ao estimar índices de vegetação na bacia hidrográfica do rio Pajeú, encontraram predomínio de solo recoberto de Caatinga com índices de SAVI superiores a 0,41 nos anos de 2005 e 2014, esses valores se assemelham com os valores de caatinga encontrado neste trabalho. Diferentemente do valor médio obtido para

imagem da data 26/09/1989 (Figura 9C) que foi de 0,35, Oliveira (2017) ao estudar esse mesmo índice de vegetação para bacia hidrográfica do Alto Ipanema localizada no sertão do Moxotó em Pernambuco, para data de 03/09/1989, encontrou valor médio de 0,634, logo Oliveira (2017) observou que sessenta dias antes da passagem do satélite choveu 281,3 mm, em contrapartida, para o mesmo período antecedente a passagem do satélite neste trabalho foi observado precipitação aproximadamente 50 mm.



**Figura 9.** Cartas temáticas do SAVI para bacia hidrográfica do riacho Exu em anos Seco Normal e Chuvoso para os períodos seco 20/09/2016 (A), 01/09/2009 (B) e 26/09/1989 (C) e chuvoso 08/03/1991 (D), 27/03/2004 (E) e 31/03/2011 (F).

Ao avaliar um mesmo pixel para uma área de caatinga preservada, das datas 20/09/2016 (Figura 9A) e 31/03/2011 (Figura 9F) representando o período seco de ano Seco e período chuvoso de ano Chuvoso obteve-se os valores de 0,35 e 0,55, respectivamente. Silva (2017) ao estudar o município de Petrolina-PE, encontrou valores de SAVI da ordem de 0,19 e 0,43 para um mesmo pixel em diferentes datas em áreas de caatinga o que denota uma variação temporal da vegetação assim como neste trabalho.

Os valores máximo e mínimo variaram de 0,81 na Figura 9D e -0,30 na Figura 9B, respectivamente. Os menores valores de SAVI, assim como no NDVI, foram observados em topos de nuvens (valores negativos), corpos hídricos, solo exposto ou com pouca vegetação.

Os maiores valores observados nas imagens do período seco estão em uma área de serra com caatinga preservada, ao norte central das Figuras 9A, 9B e 9C e ao sul nas linhas de drenagem da bacia.

Os parâmetros estatísticos encontrados para o SAVI na área de estudo estão exibidos na Tabela 13. Verificou-se que o DP variou de 0,06, para data 20/09/2016 (Figura 9A), a 0,13 para 08/03/1991 (Figura 9D) assemelhando-se ao NDVI. A imagem da data 31/03/2011 (Figura 9F) assim como no NDVI, o SAVI apresentou menor coeficiente de variação (CV), 0,17, remetendo a uma maior homogeneidade.

**Tabela 13.** Parâmetros estatísticos do SAVI para bacia hidrográfica do riacho Exu.

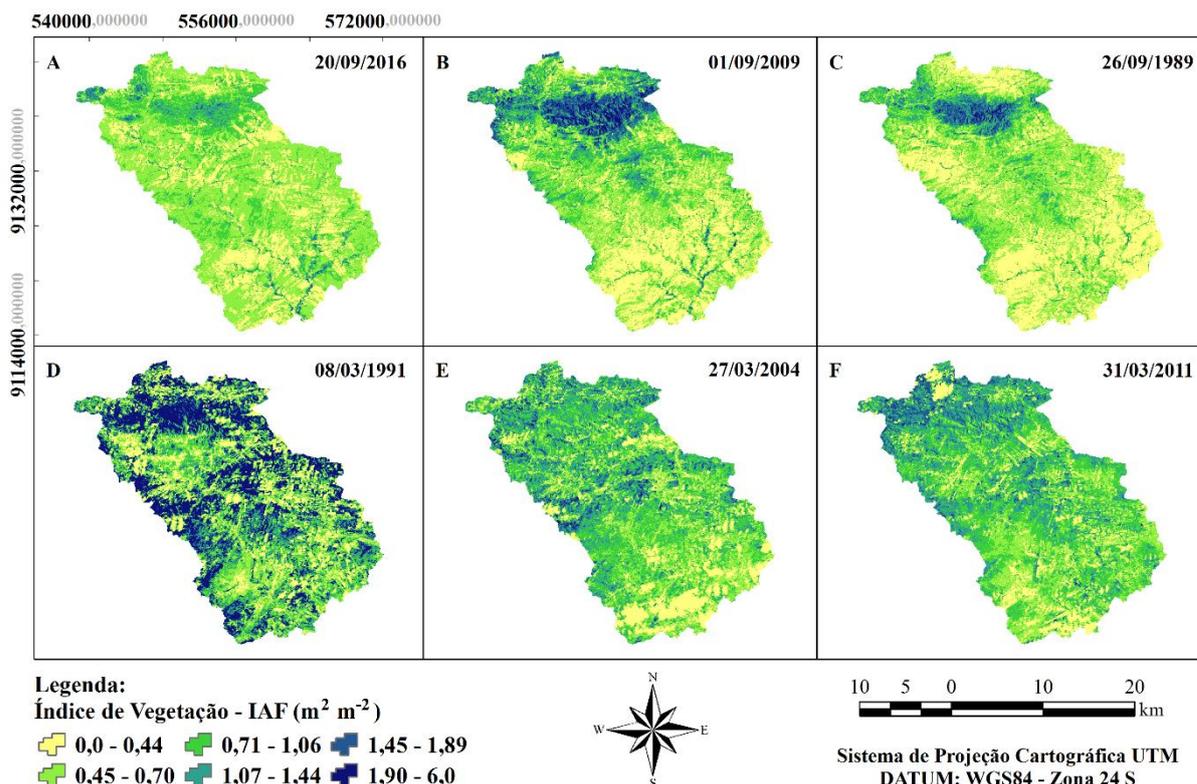
Datas	SAVI				
	Mínimo	Máximo	Médio	DP	CV
26/09/1989	-0,28	0,75	0,35	0,09	0,26
01/09/2009	-0,30	0,72	0,36	0,11	0,30
20/09/2016	-0,20	0,77	0,30	0,06	0,20
08/03/1991	-0,27	0,81	0,58	0,13	0,22
27/03/2004	-0,29	0,73	0,53	0,11	0,21
31/03/2011	-0,26	0,75	0,52	0,09	0,17

As imagens que apresentaram maiores valores de CV foram das datas 26/09/1989 (Figura 9C) e 01/09/2009 (Figura 9B) que representaram o período seco em anos Chuvoso e Normal e obtiveram, respectivamente, 0,26 e 0,30 apresentando-se em tons mais heterogêneos comparado as demais estudadas.

#### 5.3.4 IAF

O Índice de Área Foliar (IAF) da bacia hidrográfica do riacho Exu está representada na Figura 10 para as datas 20/09/2016 (A), 01/09/2009 (B) e 26/09/1989 (C), representando período seco em anos Chuvoso, Normal e Seco respectivamente. Enquanto as datas 08/03/1991 (D), 27/03/2004 (E) e 31/03/2011 (F) representado o período chuvoso em anos Seco, Normal e Chuvoso respectivamente. O IAF assim como NDVI e o SAVI apresenta valores maiores nas imagens do período chuvoso do que as imagens do período seco o que evidencia o fator precipitação como determinante no aumento dos índices de vegetação.

Os maiores valores de IAF estão representados em valores que variam do verde escuro ao azul escuro que ficam mais evidentes nas Figuras 10D, 10E e 10F (período chuvoso), os tons de cores em azul observados nas imagens do período seco estão em uma área de serra na parte alta da bacia com caatinga preservada, ao norte central das Figuras 10A, 10B e 10C e ao sul nas linhas de drenagem da bacia o que ocorre similarmente no NDVI e SAVI.



**Figura 10.** Cartas temáticas do IAF para bacia hidrográfica do riacho Exu em anos Seco Normal e Chuvoso para os períodos seco 20/09/2016 (A), 01/09/2009 (B) e 26/09/1989 (C) e chuvoso 08/03/1991 (D), 27/03/2004 (E) e 31/03/2011 (F).

Os valores mínimos obtidos foram de  $0,0 m^2 m^{-2}$  para todas as imagens, os menores valores de IAF foram encontrados em topo de nuvens, corpos hídricos e solo exposto corroborando com Souza (2014) que também encontrou menores valores de IAF em água e área de solo exposto. Os maiores valores de IAF foram observados em áreas com vegetação densa. Silva (2014) ao analisar os índices de vegetação de bacia hidrográfica inserida no município de São João do Cariri-PB, região semiárida observou que a vegetação apresentou maior densidade nas áreas correspondentes aos locais mais elevados ou às margens dos corpos d'água, corroborando com o presente estudo.

As médias encontradas para o IAF variaram do valor mínimo de  $0,46 m^2 m^{-2}$  para Figura 10A (20/09/2016), a qual representa o período seco de ano Seco, e do valor máximo de

2,92 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> para Figura 10D (08/03/1991) que representa o período chuvoso de ano Seco. A imagem da data 08/03/1991 (Figura 10D) apresenta valores superiores as demais imagens do período chuvoso (Figura 10E e 10F). Nos índices de vegetação NDVI e SAVI a imagem da data 08/03/1991 também havia mostrado valores de média maior, porém menos discrepantes que o do IAF. Um conjunto de fatores ocorreram para que a imagem do dia 08/03/1991 (Figura 10D) possuísse maiores valores médios para os índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF), um desses fatores é que apesar de ter possuído menor precipitação acumulada antecedente a passagem do satélite em comparação com as imagens dos anos de 2004 e 2011, possivelmente estas chuvas ocorreram em épocas que favoreceram ao desenvolvimento da vegetação levando a uma maior atividade fotossintética, proporcionando condições ótimas para o crescimento e o acúmulo de biomassa da vegetação. Outro fator que possivelmente pode ter ocorrido é a mudança da paisagem, logo existe uma variação temporal considerável entre os anos avaliados.

Na Tabela 14 observa-se que os valores mínimo e máximo pouco variaram para todas as imagens. Dentre as imagens do período seco a do dia 01/09/2009 (Figura 10B) foi a que apresentou maior média comparado as Figuras 10A e 10C, sendo pouca a diferença para a imagem do dia 26/09/1989 (Figura 10C). O desvio padrão (DP) variou de 0,19 para a imagem ano de 2016 a 1,99 para imagem de 1991. O coeficiente de variação (CV) foi menor (0,38) para Figura 10F denotando uma maior homogeneidade de seus valores comparado as demais imagens, em contraponto a Figura 10D foi a que apresentou maior CV (0,68) apresentando uma maior variabilidade espacial. Oliveira (2017) encontrou valores de DP variando entre 0,245 e 1,88 e CV com valor mínimo de 0,52 e máximo de 0,76 resultado que se aproximam apesar da distância entre as áreas em estudo.

**Tabela 14.** Parâmetros estatísticos do IAF para bacia hidrográfica do riacho Exu.

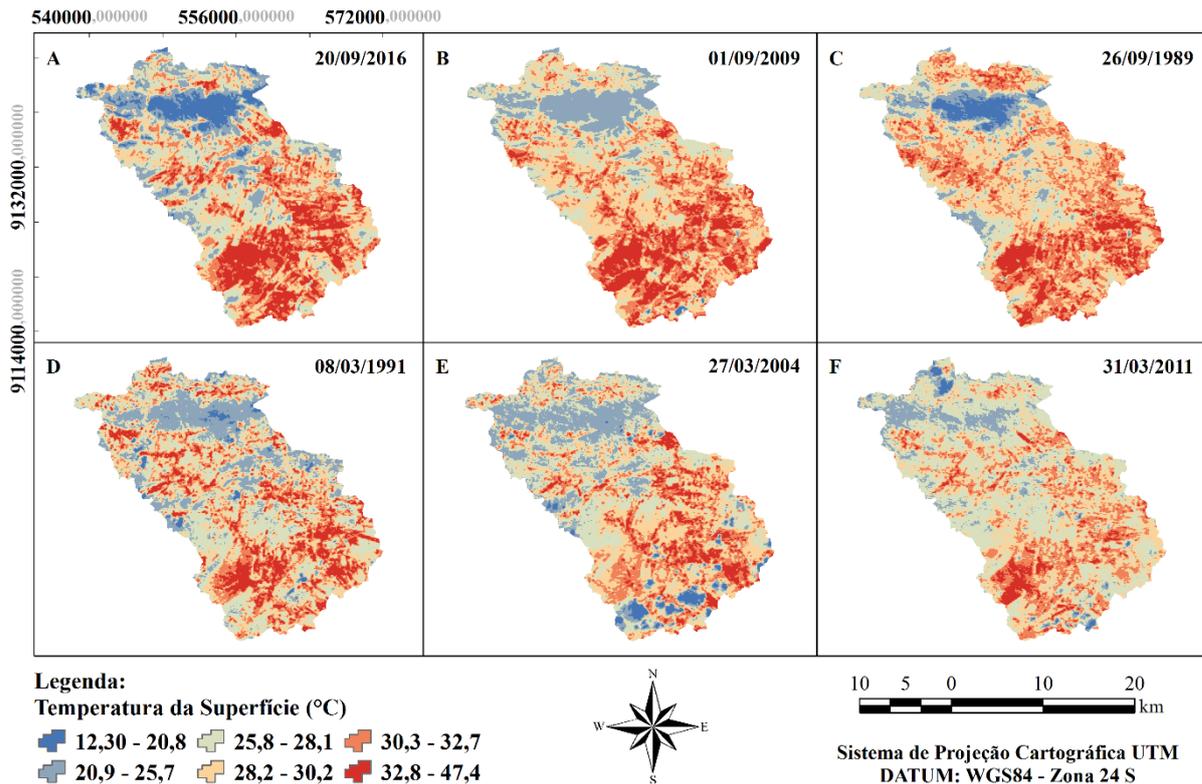
Datas	IAF (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )				
	Mínimo	Máximo	Médio	DP	CV
26/08/1989	0,0	6,0	0,67	0,40	0,60
01/09/2009	0,0	6,0	0,71	0,45	0,63
20/09/2016	0,0	5,98	0,46	0,19	0,41
08/03/1991	0,0	6,0	2,92	1,99	0,68
27/03/2004	0,0	6,0	1,68	0,83	0,49
31/03/2011	0,0	5,97	1,49	0,57	0,38

### 5.3.5 Temperatura da superfície

A temperatura da superfície da bacia hidrográfica do riacho Exu está representada pela carta temática observada na Figura 11 para os dias 20/09/2016 (A), 01/09/2009 (B) e 26/09/1989 (C) representando o período seco e para o período chuvoso os dias 08/03/1991 (D), 27/03/2004 (E) e 31/03/2011 (F) de anos Seco, Normal e Chuvoso respectivamente. Os menores valores para temperatura da superfície estão expostos em tons de azul, valores intermediários podem ser observados em tons de verde claro e amarelo e os maiores valores estão apresentados em tons laranja e vermelho.

As menores temperaturas foram observadas em pequenos corpos hídricos e topos de nuvens e em locais de maior altitude com vegetação preservada corroborando com Bezerra et al. (2014) que também registrou menores temperaturas da superfície em relevo com maiores altitudes. As maiores temperaturas foram observadas em regiões com solo exposto, esse comportamento foi percebido por Oliveira et al. (2014) em estudo também no estado de Pernambuco. De maneira geral como era esperado, as imagens do período chuvoso apresentaram menor média de temperatura da superfície do que as imagens do período seco.

Ao analisar um mesmo pixel em área de caatinga preservada foram encontrados para as Figuras 11A (20/09/2016), 11B (01/09/2009) e 11C (26/09/1989) valores de temperatura da superfície de 29,35°C, 23,1°C e 22,6°C respectivamente, para as Figuras 11D (08/03/1991), 11E (27/03/2004) e 11F (31/03/2011) obteve-se os valores de 22,4°C, 22,6°C e 23,05°, respectivamente. Como era de se esperar as maiores temperaturas ocorreram em anos secos e em áreas de solo sem vegetação. Em um mesmo pixel para vegetação rala obteve-se valores que variaram de 40,05°C para Figura 11A (20/09/2016) e 25,05°C para a Figura 11D (08/03/1991), para um mesmo pixel em solo exposto os valores variaram de 46,05°C para Figura 11A (20/09/2016) e 27,45°C para Figura 11F (31/03/2011), havendo dessa forma, um aumento da temperatura da superfície de até 16,7°C, observado na Figura 11A, ao passar da área de caatinga preservada para aquelas com solo exposto. Analogamente ao presente estudo Lins et al. (2017) ao estudarem o município de Arcoverde-PE detectaram um aumento de temperatura da ordem de 15,5 °C ao passar de regiões com vegetação abundante para aquelas de solo exposto.



**Figura 11.** Cartas temáticas da temperatura da superfície para bacia hidrográfica do riacho Exu em anos Seco Normal e Chuvoso para os períodos seco 20/09/2016 (A), 01/09/2009 (B) e 26/09/1989 (C) e chuvoso 08/03/1991 (D), 27/03/2004 (E) e 31/03/2011 (F).

Silva (2016) na observação de um pixel específico analisando os distintos uso e ocupações do solo no município de Iguatu-CE encontrou valor superior para área de caatinga (32,12°C), porém os valores de 25,55°C na água e 41,74°C em solo exposto denotam coerência com o presente trabalho. Souza et al. (2016) encontraram valores de temperatura para solo exposto de 31°C, e para vegetação rala 30°C, assemelhando-se também com os resultados obtidos neste estudo.

Nos parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 15, observa-se que os valores variaram do valor mínimo que remete a topos de nuvens de 12,31°C para Figura 11B (01/09/2009), a 47,45°C para valor máximo encontrado na Figura 11A (20/09/2016) que tem relação com solo exposto. As imagens do período chuvoso apresentaram menores médias de temperatura da superfície, logo são as que possuem maiores índices de vegetação indicando uma relação inversamente proporcional entre ambas. A maior média encontrada com o valor de 39,15°C foi para imagem do período seco do ano seco. O desvio padrão (DP) variou entre 3,37 para Figura 11A a 1,23 para Figura 11F. O coeficiente de variação (CV) variou entre 0,05 a 0,10, sendo a imagem do período chuvoso em ano chuvoso (Figura 11F) foi a que

apresentou menor variabilidade espacial, expondo uma maior homogeneidade comparada as demais.

**Tabela 15.** Parâmetros estatísticos da temperatura da superfície para bacia hidrográfica do riacho Exu.

<b>Datas</b>	<b>TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE (°C)</b>				
	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Médio</b>	<b>DP</b>	<b>CV</b>
26/08/1989	21,35	35,99	29,16	2,18	0,07
01/09/2009	12,31	38,43	29,39	2,97	0,10
20/09/2016	28,74	47,45	39,15	3,37	0,09
08/03/1991	15,15	34,31	26,06	2,43	0,09
27/03/2004	13,74	33,93	25,02	2,17	0,08
31/03/2011	14,68	31,45	25,11	1,23	0,05

## 6. CONCLUSÕES

Conclui-se, portanto, que a utilização da técnica dos Quantis possibilitou classificar os 31 anos da série histórica de acordo com a precipitação anual em anos secos, normais e chuvosos.

Através tanto da técnica dos Quantis quanto ao IAC foi possível notar a variabilidade interanual da precipitação mais explícita nos anos 2011 e 2012. No IAC foi observado que os eventos extremos de precipitação em 1988, 1989 classificados como “Extremamente Úmido” sofreram forte influência do fenômeno La niña, os anos de 1993 e 1998 anos classificados como “Extremamente Seco” sofreram forte influência do fenômeno El niño corroborando com pesquisas em distintos locais no semiárido. Também foi possível constatar com o IAC que no período de 2012 a 2016 prevalece uma seca prolongada.

Pelos resultados gerados foi possível constatar que o IAC e a técnica dos Quantis são ferramentas relevantes para classificação e avaliação da variabilidade pluviométrica.

O sensoriamento remoto como ferramenta de investigação do uso e ocupação do solo mostrou-se de grande importância no monitoramento da bacia hidrográfica do riacho Exu, durante o período de 27 anos em que foram utilizadas as imagens orbitais do *Landsat 5 - TM* e do *Landsat 8 – OLI/TIRS*, podendo auxiliar no manejo e conservação do solo.

A análise dos parâmetros biofísicos do albedo da superfície, NDVI, SAVI, IAF e temperatura da superfície por meio do SEBAL permitiu avaliar de maneira eficaz a dinâmica espaço-temporal na superfície da bacia. De maneira geral foi observado que o aumento dos índices de vegetação reflete em menores valores para o albedo e temperatura da superfície.

Observou-se em áreas isoladas para imagens do período seco, altos valores de albedo e temperatura da superfície concomitantemente a baixos índices de vegetação levando a uma suspeita de área degradada, porém ao analisar as imagens do período chuvoso conclui-se, portanto que não há persistência de uma área degradada visto também que áreas de vegetação verde persiste em boa parte da área nos anos analisados. Apesar de não haver persistência de áreas degradadas, foi possível detectar áreas com maior grau de susceptibilidade à degradação na parte sudoeste da bacia.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, E. M.; ANDRADE, S. C. P.; MORAIS, H. F.; DINIZ, J. M. T.; SANTOS, C. A. C. Análise do comportamento do NDVI e NDWI sob diferentes intensidades pluviométricas no município de Souza-PB. **Revista Estudos Geoambientais – online**. n.1, v.1, 2014.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, p. 380-394, 2007.

ALLEN, R. G.; TREZZA, R.; TASUMI M. Surface energy balance algorithms for land. Advance training and Users Manual, **Idaho Implementation**, v.1.0, p.98, 2002.

ALVES, L. E. R.; GOMES, H. B.; SANTOS; M. N.; FREITA, I. G. F. Balanço de radiação através do Landsat-8 na bacia do Rio Pajeú. **Revista do Departamento de Geografia**, v.33, p.117-127, 2017.

ARAÚJO, L. E.; MORAES NETO, J. M.; SOUSA, F. A. S. Análise Climática da Bacia do Rio Paraíba - Índice de Anomalia de Chuva (IAC). **Engenharia Ambiental**, v.6, p.508-523, 2009.

ARRAES, F. D. D.; ANDRADE, E. M.; SILVA, B. B. Dinâmica do balanço de energia sobre o açude Orós e suas adjacências. **Revista Caatinga**, v.25, p.119-127, 2012.

ASCE-EWRI - American Society of Civil Engineers - Environmental and Water Resources Institute. ASCE-EWRI Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Report, ASCE, 2005.

BASTIAANSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. 237 f. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 1995.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL – Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hidrology**, Amsterdam, v. 229, p. 87-100, 2000.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v.212-213, p.213-229, 1998b.

BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J., MA, Y.; MORENO, J. F.; ROERINK, G. J.; VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v.212-213, p.198-212, 1998a.

BEZERRA, J. M.; MOURA, G. B. A.; SILVA, B. B.; LOPES, P. M. O.; SILVA, E. F. F. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.73-84, 2014.

BEZERRA, M. V. C.; SILVA, B. B.; BEZERRA, B. G. Avaliação dos efeitos atmosféricos no albedo e NDVI obtidos com imagens de satélite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.709-717, 2011.

BRAGA JUNIOR, H, A. C. **Taxa de entrega de sedimentos na bacia do Riacho Exu – semiárido Pernambucano**. 48 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Departamento de Tecnologia Rural, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE. 2015.

CARUZZO, A.; ROCHA, H. R. Estimativa do índice de área foliar (IAF) em regiões de pastagem e floresta com um método indireto (gap fraction) durante o experimento AMC/LBA. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 11, 2000. Rio de Janeiro-RJ. **Anais...** Editora, Rio de Janeiro. p.2478-2485, 2000.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v.113, p.893-903, 2009.

CHAVEZ Jr, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v.24, pp. 459-479, 1988.

COMPAORÉ, H.; HENDRICKX, J. M.; HONG, S.; FRIESEN, J.; VAN DE GIESEN, N. C.; RODGERS, C.; SZARZYNSKI, J.; VLEK, P. L. G. Evaporation mapping at two scales using

optical imagery in the White Volta Basin, Upper East Ghana. **Physics and Chemistry of the Earth**, v.33, p.127-140, 2008.

COURAULT, D.; SEGUIN, B.; OLIOSO, A. Review to estimate Evapotranspiration from remote sensing data: some examples from the simplified relationship to the use mesoscale atmospheric models. In: **ICID Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions**, 2003. 18p.

CPRM. COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS. Serviço Geológico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: Diagnostico do município de Serra Talhada**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. 12p.

CUNHA, A. P. M. A.; ALVALÁ, R. C. S.; OLIVEIRA, G. S. Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, p.139-152, 2013.

CUNHA, J. E. B. L.; RUFINO, I. A.; SILVA, B. B.; CHAVES, I. D. 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, p.539-548, 2012.

DA SILVA, D. F. **Análise de aspectos climatológicos, agroeconômicos, ambientais e de seus efeitos sobre a bacia hidrográfica do Rio Mundaú (AL e PE)**. 209 f. Tese (Programa de Doutorado Temático em Recursos Naturais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB. 2009.

DA SILVA, D. F.; GALVÍNCIO, J. D.; NÓBREGA, R. S. Influência da variabilidade climática e da associação de fenômenos climáticos sobre sub-bacias do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n.19, p.46-56, 2011.

DA SILVA, D. F.; SOUSA, F. A. S.; KAYANO, M. T. Uso de IAC e Ondeletas para análise da influência das multi-escalas temporais na precipitação da bacia do Rio Mundaú. **Engenharia Ambiental**, v.6, p.180-195, 2009.

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, p.24-31, 2010.

DUARTE, C. C.; NÓBREGA, R. S.; COUTINHO R. Q. Análise Climatológica e dos eventos extremos de chuva no município de Ipojuca, Pernambuco. **Revista de Geografia**, v.32, p.158-176, 2015.

FARIAS, A.; SILVA, M.; ALVES, T.; BARBOSA, M.; MORAES NETO, J. Análise das Classes de Cobertura Vegetal no Entorno do Açude Manoel Marcionílo, Taperoá-PB. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.6, p.1719-1732, 2013.

FARIAS, R. F. L.; ALVES, K. M. A. S.; NÓBREGA, R. S. Climatologia da ocorrência de eventos extremos de precipitação na mesorregião do Sertão Pernambucano. **Revista Geonordeste**, v.1, p.930-941, 2012.

FERRAZ, R. P. D.; MEIRELLES M. S. P.; JOBÁGGY, E.; JONATHAN, M.; COUTINHO, H. L. C. Utilização de dados MODIS e modelo SEBAL para a estimativa da perda de água por evapotranspiração: Uma proposição metodológica para o monitoramento do impacto da expansão da cultura canavieira na dinâmica hídrica regional. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. Natal-RN. **Anais...** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), p.175-182, 2009.

FERREIRA, H. S.; FERREIRA, J. M. S.; SILVA H. A.; FERREIRA, P. S.; GOMES, V. P.; GALVÍNCIO, J. D. Aplicação de técnicas de sensoriamento remoto para monitorar o comportamento da vegetação de Caatinga frente às condições climáticas no município de Petrolina-PE. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Semoto - SBSR, 16. Foz Do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), p.3082-3089, 2013.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3ª Edição: ampliada e atualizada. Oficina de Textos. São Paulo, 2011.

FREITAS, M. A. S. A Previsão de Secas e a Gestão Hidroenergética: O Caso da Bacia do Rio Parnaíba no Nordeste do Brasil. In: Seminário Internacional sobre Represas y Operación de Embalses. **Anais...** Puerto Iguazú, v.1, p.1-1, 2004.

FREITAS, M. A. S. Um Sistema de Suporte à Decisão para o Monitoramento de Secas Meteorológicas em Regiões Semi-Áridas. **Revista Tecnologia**, v.Suplemento, p.84-95, 2005.

- GARRISON, J. D.; ADLER, G. P. Estimation of precipitable water over the United State for application to the division of solar radiation into its direct and diffuse components. **Solar Energy**, v.44, p.225-241, 1990.
- GUIMARÃES, A. P. **Dinâmica da resposta espectral da vegetação de caatinga na bacia hidrográfica do açude Soledade, utilizando técnicas de sensoriamento remoto**. 49 f Dissertação (Mestrado) Universidade Federal da Paraíba, Areia-PB. 2009.
- 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**, v.57, p.162-167, 2005.
- GUSMÃO, A. C. V. L.; SILVA, B. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; & GALVINCIO, J. D. Determinação do saldo radiativo na Ilha do Bananal, TO, com imagens orbitais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.1107-1114, 2012.
- HARTMANN, D. L. **Global physical climatology**. v.56. San Diego, California, Academic Press. 1994.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.25, p.295-309, 1988.
- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. London: Academic Press., 1983. 390p.
- JULIEN, Y.; SOBRINO, J. A. The yearly land cover dynamics (YLCD) method: Na analysis of global vegetation from NDVI and LST parameters. **Remote Sensing of Environment**, v.113, p.329-334, 2009
- LEBLANC, S. G.; CHEN, J. M. A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements. **Agricultural Forest Meteorological**, v.110, p.125-139, 2001.
- LINS, F. A. C.; ARAÚJO, D. C. S.; SILVA, J. L. B.; LOPES, P. M. O.; OLIVEIRA, J. D. A.; SILVA, A. T. G. C. S. G. Estimativa de parâmetros biofísicos e evapotranspiração real no semiárido Pernambucano utilizando sensoriamento remoto. **Irriga**, edição especial, IRRIGA & INOVAGRI, v.1, p.64-75, 2017.

LIU, Y.; HIYAMA, T.; YAMAGUCHI, Y. Scaling of land surface temperature using satellite data: A case examination on ASTER and MODIS products over a heterogeneous terrain area. **Remote Sensing of Environment**, v.105, p.115-128, 2006.

LOPES, I.; GUIMARÃES, M. J. M.; MELO, J. M. M. Análise da precipitação da estação da Embrapa semiárido, projeto bebedouro Pretolina/PE, através da técnica de Quantis. In: Workshop Internacional Sobre Água no Semiárido Brasileiro, 2. **Anais...** Campina Grande-PB, 2015.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; BESERRA, E. A.; LACERDA, F. F. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiárida: Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro.** Instituto Nacional do Semiárido. Campina Grande-PB. Cap. 13, p.383-422, 2011.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagem de sensoriamento remoto.** Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), Universidade de Brasília (UnB), Brasília. 2012.

MOURA, M. S. B.; GALVINCIO, J. D.; BRITO, L. T. D. L.; SOUZA, L. S. B.; SÁ, I. I. S.; SILVA, T. G. F. D. **Clima e água de chuva no semi-árido: Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro.** Cap. 2, p.37-59, 2007.

NICÁCIO, R. M. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco.** 337 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Rio de Janeiro-RJ. 2008.

NÓBREGA, R. S.; SANTIAGO, G. A. C. F. Tendência de temperatura na superfície do mar nos oceanos atlântico e pacífico e variabilidade de precipitação em Pernambuco. **Mercator**, v.13, p.107-118, 2014.

OLIVEIRA, J. D. A. **Avaliação de degradação e mudanças ambientais na bacia hidrográfica do Alto Ipanema.** 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife-PE. 2017.

OLIVEIRA, L. M.; MONTENEGRO, S. M.; SILVA, B. B.; ANTONINO, A. C.; MOURA, A. E. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do

SEBAL e produtos MODIS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.1039-1046, 2014.

PACHECO, A. P.; LUCAS, A. A.; SILVA, B. B.; MARIANO, G. Desertificação: Contextualização e Sensoriamento Remoto. **Estudos Geológicos**, v.24, p.109-126, 2014.

PAIVA, C. M. **Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR**. 218 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ. 2005.

PEREIRA, D. D. **Cariris paraibanos: do sesmarialismo aos assentamentos de reforma agrária. Raízes da desertificação?** 341 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia Recursos Naturais, Campina Grande-PB. 2008.

PINKAYAN, S. **Conditional Probabilities of Occurrence of Wet and Dry Years over Large Continental Area**. Hydrology Papers, Number 12, Colorado State University, Fort-Collins, Col, U.S.A. 1966.

PONZONI, F. J. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2ed., São Paulo, Oficina de Textos, 2012.

RÊGO, S. C. A.; LIMA, P. P. S.; LIMA, M. N. S.; MONTEIRO, T. R. R.; Análise comparativa dos índices de vegetação NDVI e SAVI no município de São Domingos do Cariri–PB. **Revista Geonorte**, Edição Especial, v.2, p.1217-1229, 2012.

REPELLI, C. A.; FERREIRA, N. S.; ALVES, J. M. B.; NOBRE, C. A. Índice de anomalia de precipitação para o Estado do Ceará. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia e Congresso da FLISMET, 10, 8. **Anais...** Brasília-DF. 1998.

RIBEIRO, E. P.; NÓBREGA, R. S.; FILHO, F. O. M.; MOREIRA, E. B. M. Estimativa dos índices de vegetação na detecção de mudanças ambientais na bacia hidrográfica do rio Pajeú. **Geosul**, v.31, p.59-92, 2016.

RODRIGUES, J. D.; ANDRADE, E. D.; TEIXEIRA, A. D. S.; SILVA, B. D. Sazonalidade de variáveis biofísicas em regiões semiáridas pelo emprego do sensoriamento remoto. **Engenharia Agrícola**, v.29, p.452-465, 2009.

VAN ROOY, M. P. A rainfall anomaly index independent of time and space. **NOTOS. Weather Bureau of South Africa**, v.14, p.43-48, 1965.

RUHOFF, A. L.; SILVA, B. B.; ROCHA, H. R. Determinação da irradiância solar no topo da atmosfera para cálculo do albedo e balanço de energia a partir de imagens LANDSAT 8 OLI. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 17. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), p.4495-4502, 2015.

SANCHES, L.; ANDRADE, N. L. R.; NOGUEIRA, J. S.; BIUDES, M. S.; & VOURLITIS, G. L. Índice de área foliar em floresta de transição amazônia cerrado em diferentes métodos de estimativa. **Ciência e Natureza**, v.30, p.57-69, 2008.

SANTOS, A. M.; GALVÍNIO, J. D. Mudanças climáticas e cenários de susceptibilidade ambiental à desertificação em municípios do estado de Pernambuco. **Revista Eletrônica de Geografia: observatorium**, v.5, p.66-83, 2013.

SANTOS, C. G. **Erosão Hídrica e Taxa De Entrega De Sedimentos Na Bacia Hidrográfica Semiárida Do Riacho Exú, PE**. 109 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Agronomia, Recife, PE. 2013.

SILVA, A. P. N.; MOURA, G. B. A.; GIONGO, P. R.; SILVA, B. B. Albedo de superfície estimado a partir de imagens Landsat 5 – TM no semiárido brasileiro. **Revista de Geografia**, v.27, p.154-168, 2010.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C. Balanço de radiação no perímetro irrigado São Gonçalo – PB mediante imagens orbitais. **Revista Caatinga**, v. 24, p.145-152, 2011.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M.; MONTENEGRO, S. M.; BARBOSA JUNIOR, B. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.1, p.3-8, 2016.

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

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5 TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.13, p.201-211. 2005a.

SILVA, D. A. O. **Interferência da precipitação em variáveis ambientais utilizadas para detecção de mudanças no município de Petrolina - PE**. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife-PE. 2017.

SILVA, E. R. A. C.; MELO, J. G. S.; GALVÍNCIO, J. D.; Identificação das Áreas Susceptíveis a Processos de Desertificação no Médio Trecho da Bacia do Ipojuca - PE Através do Mapeamento do Estresse Hídrico da Vegetação e da Estimativa do Índice de Aridez. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.4, p.629-649, 2011.

SILVA, G. J. F. **Estimativa de indicadores biofísicos para avaliação do processo de desertificação no município de São João do Cariri-PB**. 126 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Programa de Pós-Graduação em Geografia, João Pessoa-PB. 2014.

SILVA, J. L. B. **Monitoramento espaço-temporal da cobertura vegetal do bioma caatinga no Ceará mediante imagens orbitais**. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife-PE. 2016.

SILVA, P. C. G.; MORA, M. S. B.; KIIL, L. H. P.; BRITO, L. T. L.; PEREIRA, L. A.; SÁ, I. B.; CORREIA, R. C.; TEIXEIRA, A. H. C.; CUNHA, T. J. F.; FILHO, C. G. **Caracterização do semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos**. In: SÁ, I. B.; SILVA, P. C. G. (Org). **Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Petrolina: Embrapa, Cap. 1, p.18-48, 2010.

SOBRINO, J.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. **Remote Sensing of Environment**, v.90, p.434-440, 2004.

SOUSA, A. B.; MELO, R. A.; SILVA, D. F. A. Avaliação climática e dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe (CE). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.6, p.1115-1140, 2013.

SOUZA, J. F. **Análise das mudanças do uso e ocupação do solo, variabilidade da temperatura e do saldo de radiação em João Pessoa – PB**. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, 2014.

SOUZA, J. F.; SILVA, R. M.; SILVA, A. M. Influência do uso e ocupação do solo na temperatura da superfície: o estudo de caso de João Pessoa – PB. **Ambiente Construído**, v.16, p.21-37, 2016.

STARKS, P. J.; NORMAN, J. M.; BLAD, B. L.; WALTER-SHEA, E. A.; & WALTHALL, C. L. Estimation of shortwave hemispherical reflectance albedo from bi-directionally reflected radiance data. **Remote Sensing of Environment**, v.38, p.123-134, 1991.

USGS. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Landsat Missions Timeline. Disponível on-line em: <[http://landsat.usgs.gov/about\\_mission\\_history.php](http://landsat.usgs.gov/about_mission_history.php)>. Acesso: 04 de agosto de 2017a.

USGS. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Landsat Missions. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>>. Acesso: 04 de agosto de 2017c.

USGS. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Landsat-8 Pre-WRS-2 Data Products. 2015. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>>. Acesso: 04 de Agosto de 2017b.

WANG, S.; GRANT, R. F.; VERSEGHY, D. L.; BLACK, T. A. Modelling plant carbon and nitrogen dynamics of a boreal aspen forest in CLASS – the Canadian Land surface Scheme. **Ecology Modelling**. v.142, p.135-154, 2001.

WENG, Q.; QUATTROCHI, D. A. Thermal remote sensing of urban areas: Na introduction to the special issue. **Remote Sensing of Environment**, v.104, p.119-122, 2006.

XAVIER, T. M. B. S. **Tempo de Chuva: Estudos Climáticos e de Previsão para o Ceará e Nordeste Setentrional**. Fortaleza; Ed. ABC., 2001.

XAVIER, T. M. B. S.; SILVA, J. F.; REBELLO, E. R. G. **A Técnica dos Quantis e suas Aplicações em Meteorologia, Climatologia e Hidrologia em Regiões Brasileiras**. Brasília-DF: Thesaurus Editora de Brasília Ltda. v.1. 2002. 144p.

XAVIER, T. M. B. S.; XAVIER, A. F. S. Caracterização de períodos secos ou excessivamente chuvoso no Estado do Ceara através da técnica dos quantis: 1964-1998. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.14, p.63-78, 1999.

ZHANG, Y.; ODEH, I.O.A.; HAN, C. Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a subpixel image analysis. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.11, p.256-264, 2009.