

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

ALAN CÉZAR BEZERRA

MUDANÇAS AMBIENTAIS NO ESTADO DE PERNAMBUCO

RECIFE, 2020

ALAN CÉZAR BEZERRA

MUDANÇAS AMBIENTAIS NO ESTADO DE PERNAMBUCO

Tese de doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Geber Barbosa Albuquerque de Moura

RECIFE, 2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B574m Bezerra, Alan César

Mudanças ambientais no estado de Pernambuco / Alan César Bezerra. - 2020.

142 f. : il.

Orientador: Geber Barbosa Albuquerque de Moura.

Inclui referências e apêndice(s).

Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, 2020.

1. Google Earth Engine. 2. MODIS. 3. Parâmetros Biofísicos. 4. Teste de Tendência. I. Moura, Geber Barbosa Albuquerque de, orient. II. Título

CDD 630

ALAN CÉZAR BEZERRA

MUDANÇAS AMBIENTAIS NO ESTADO DE PERNAMBUCO

Tese defendida e aprovada no dia 31 de Agosto de 2020 pela Banca Examinadora

Orientador:

Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura
UFRPE

Examinadores:

Prof^a. Dr^a. Cristina Rodrigues Nascimento
UFRPE

Prof. Dr. Eberson Pessoa Ribeiro
IFPE

Prof^a. Dr^a. Josiclêda Domiciano Galvêncio
UFPE

Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes
UFRPE

DEDICO E OFEREÇO

À minha esposa, Jessyca, e ao meu filho, Luca, por toda compreensão e incentivo;

Aos meus pais, Joselito e Mônica, e aos meus irmãos, Artur, Aline e Jonas, por todo apoio e compreensão;

Aos meus Avôs, tios, tias, primos, por todo carinho, apoio e motivação.

*“E é tão bonito quando a gente entende
Que a gente é tanta gente onde quer que a gente vá”
(Gonzaguinha)*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de estudos e pelos conhecimentos adquiridos.

Ao Professor Dr. Geber Moura por toda a confiança e os ensinamentos, que me ajudaram muito no crescimento profissional e pessoal.

Aos amigos de ofício Alexandre, Apolinário, Bruna, Caio, Drausio, Eduardo, Elton, Felipe Reis, Filipe Lima, Genival, João Amorim, João Paulo, Larissa, Luiz Guilherme, Nicole, Paula, Rafaela, Rodolfo, Rodrigo, Thiago, que fazem parte da UFRPE/FAST (Unidade Acadêmica de Serra Talhada), agradeço por todos os momentos de trabalho e diversão.

Agradeço também aos professores e aos funcionários que compõem o Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola.

Aos colegas da Universidade Federal Rural de Pernambuco, em especial, Ailton, Breno, Carlos André, Diorgenes, Gebson, Gledson, Iug, Frederico, Janice, Jairo, Jhon Lennon, Joz, José Edson, José Neto, Juliana, Keila, Luiz Antônio, Miguel, Nicole, Pedro Francisco, Pedro Henrique, Prof^a Laércia, Ronaldo e Sirleide. Foram ótimos os momentos que pude desfrutar e aprender com todos vocês.

Aos meus amigos André, Anderson, Felipe, Thais, Elandia, Emanuel Pedro, Adriana, Jaime, Andréa, Chico, Leandro, Eduardo, Sidney Anderson, Rodrigo, Robson e Romildo, por todo o apoio dado ao longo dessa caminhada que se iniciou há muito tempo.

Um grande agradecimento à Jessyca por todo o companheirismo ao longo dessa jornada.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização desse trabalho, deixo os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

As geotecnologias possibilitam a análise de informações dos ecossistemas com abrangência espacial e temporal, em especial o sensoriamento remoto. Além disso, o processamento digital em nuvem permite ganho em tempo de processamento e quantidade de dados. Portanto, este estudo teve por objetivo verificar as mudanças ambientais espaço-temporais por meio de parâmetros biofísicos no estado de Pernambuco durante o período de 2000 a 2019 com uso de geotecnologias e processamento digital em nuvem. A metodologia do estudo consistiu na obtenção de dados de precipitação em 45 postos ao longo de todo o estado no período de 1987 até 2019. Esses dados foram agrupados seguindo a metodologia de análise de agrupamento com método de Ward para definição das zonas homogêneas de precipitação anual. Posteriormente, identificou-se o Índice de Anomalia de Chuva (IAC) para determinar a variabilidade das chuvas, bem como o período seco e úmido. Realizou-se uma análise dos parâmetros biofísicos com os produtos MODIS para o período de 2000 a 2019 na plataforma do *Google Earth Engine*. Foi determinada uma imagem representativa de cada ano para os índices de vegetação (NDVI, EVI e SAVI), índice de água (NDWI), albedo e temperatura da superfície. Para a determinação da imagem de cada ano, utilizaram-se dois critérios diferentes de redução: a média e a máxima. Dessa forma, foram geradas 20 imagens para cada parâmetro, totalizando 60 imagens para o período de 2000 a 2009 para o critério de redução média, e mais 60 imagens para redução máxima, totalizando 120 imagens. Verificou-se a sazonalidade dos parâmetros biofísicos nos anos considerados de precipitação extrema: muito seco e muito úmido. Com essas imagens, analisaram-se as estatísticas das imagens e a representação das cartas. Ao analisar o agrupamento dos grupos homogêneos, verificou-se a formação de 3 grupos homogêneos, um para semiárido, outro para litoral e outro para uma região de transição do agreste e zona da mata. Constatou-se a ocorrência de um período de estiagem recente durante os anos de 2012 até 2016 em todos as zonas de precipitação, sendo mais perceptível na região do grupo do semiárido, devido aos baixos índices de precipitação anual. Estatisticamente, não houve mudanças dos parâmetros biofísicos, e quanto às zonas homogêneas de precipitação, houve uma tendência de diminuição da cobertura vegetal na região do litoral de Pernambuco, para os demais grupos não houve mudanças dos parâmetros. Nos anos com precipitação extrema, há uma diferença no nível de respostas dos parâmetros biofísicos, contudo o comportamento entre eles é semelhante. Para monitoramento da precipitação no estado de Pernambuco, o parâmetro biofísico mais adequado é o índice NDWI. Na região do núcleo de desertificação de Cabrobó, parece haver um deslocamento em sentido sudeste, o que requer uma análise mais detalhada e ações do poder público para mitigar seus efeitos.

Palavras-chave: Google Earth Engine, MODIS, Parâmetros Biofísicos, Teste de Tendência.

ABSTRACT

Geotechnologies make it possible to analyze ecosystem information with spatial and temporal scope, especially remote sensing. In addition, digital cloud processing allows for increased processing time and data quantity. Therefore, this study aimed to verify spatial-temporal environmental changes through biophysical parameters in the state of Pernambuco in the period from 2000 to 2019 with the use of geotechnologies and digital processing on the cloud. The method consisted of collecting precipitation data from 45 stations throughout the state, from 1987 to 2019. These data were grouped following the cluster analysis methodology with Ward method to define homogeneous precipitation zones yearly. Then, the Rain Anomaly Index (RAI) was identified to determine the variability of rainfall, as well as the dry and the wet period. The analysis of biophysical parameters was carried out with MODIS products for the period from 2000 to 2019 on the Google Earth Engine platform. A representative image of each year was determined for the vegetation indices (NDVI, EVI and SAVI), water index (NDWI), albedo and surface temperature. To determine the image for each year, two different reduction criteria were used: the average and the maximum. Thus, 20 images were generated for each parameter in the total of 60 images for the period from 2000 to 2009 for the criterion of average reduction, and another 60 for maximum reduction, resulting in 120 images. The seasonality of the biophysical parameters was verified in the years considered of extreme precipitation: very dry and very humid. These images allowed for statistics of the images and the representation of the cards to be verified. Analysis of the grouping of homogeneous groups showed the formation of three homogeneous groups, one for the semiarid, another for the coast and another for a transition region between the wild (*agreste*) and forest zone (*zona da mata*). A period of recent drought was observed from 2012 to 2016 in all precipitation zones, and more prominent in the region of the semiarid group, due to the low annual precipitation rates. Statistically, there were no changes in biophysical parameters, and concerning the homogeneous precipitation zones, there was a tendency to reduce the vegetation cover in the coastal region of Pernambuco; the other groups showed no changes in parameters. In years of extreme precipitation, there is a difference in the level of responses of biophysical parameters, however the behavior between them is similar. For monitoring rainfall in the state of Pernambuco, the most appropriate biophysical parameter is the NDWI index. In the desertification nucleus of Cabrobó, there seems to be a shift towards the southeast, which requires a more detailed analysis and actions by the government to mitigate its effects.

Keywords: Google Earth Engine, MODIS, Biophysical Parameters, Trend Test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de Localização de Pernambuco e Postos Pluviométricos.	32
Figura 2 – Funcionamento da redução da coleção de imagens em uma única imagem.	36
Figura 3 – Gráfico de distância dos grupos ou zonas homogêneas de precipitação anual.	43
Figura 4 - Mapas dos grupos com a precipitação anual obtidos com o método hierárquico (Ward) para o estado de Pernambuco: (A) Mesorregiões; (B) Altimetria.	44
Figura 5 – Relação das Características fisiográficas da precipitação com: (A) Altitude (m); (B) Declividade (°) e (C) Distância do Mar (km).	46
Figura 6 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do albedo da superfície com valor médio do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.	50
Figura 7 -Distribuição espaço-temporal do albedo da superfície com valor médio do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.	51
Figura 8 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do NDVI com valor médio anual do pixel para 2000 – 2019.	52
Figura 9 - Distribuição espaço-temporal do NDVI com o valor médio anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.	53
Figura 10 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do EVI com valor médio anual do pixel para 2000 – 2019.	54
Figura 11 - Distribuição espaço-temporal do EVI com valor médio anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.	55
Figura 12 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do SAVI com valor médio do pixel para 2000 – 2019.	56
Figura 13 - Distribuição espaço-temporal do SAVI com valor médio anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.	57
Figura 14 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do NDWI com valor médio do pixel para 2000 – 2019.	58
Figura 15 - Distribuição espaço-temporal do NDWI com valor médio anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.	59
Figura 16 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão da temperatura da superfície(°C) com valor médio anual do pixel.	60
Figura 17 - Distribuição espaço-temporal da temperatura da superfície (°C) com valor médio anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.	61
Figura 18 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do albedo da superfície com valor máximo do pixel.	63
Figura 19 - Distribuição espaço-temporal do albedo da superfície com valor máximo do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.	63
Figura 20 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do NDVI com valor máximo anual do pixel para 2000 até 2019.	65
Figura 21 - Distribuição espaço-temporal do NDVI com valor máximo anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.	65
Figura 22 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do EVI com valor máximo do pixel.	67
Figura 23 - Distribuição espaço-temporal do EVI com valor máximo anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.	67

Figura 24- Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do SAVI com valor máximo anual do pixel.	69
Figura 25 - Distribuição espaço-temporal do SAVI com valor máximo anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.	69
Figura 26 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do NDWI com valor máximo anual do pixel.	71
Figura 27 - Distribuição espaço-temporal do NDWI com valor máximo anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.	72
Figura 28 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão da temperatura da superfície (°C) com valor máximo do pixel.	73
Figura 29 - Distribuição espaço-temporal da temperatura da superfície (°C) com valor máximo do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.	73
Figura 30 – Autocorrelação com redução do pixel médio dos parâmetros biofísicos.	77
Figura 31 – Regressão Linear Simples dos Parâmetros Biofísicos com Tempo: (A) Albedo; (B) NDVI; (C) EVI; (D) SAVI; (E) NDWI; (F) Temperatura da Superfície.	77
Figura 32 – Média mensal do albedo e média do total mensal de precipitação de Pernambuco: (A) 2004; (B) 2012.	79
Figura 33 – Diagrama de dispersão do albedo e média do total mensal de precipitação de Pernambuco normalizados: (A) 2004; (B) 2012.	80
Figura 34 – Média mensal do NDVI e média do total mensal de precipitação de Pernambuco: (A) 2004; (B) 2012.	81
Figura 35 – Diagrama de dispersão do NDVI e média do total mensal de precipitação Pernambuco normalizados: (A) 2004; (B) 2012.	82
Figura 36 – Média mensal do EVI e média do total mensal de precipitação de Pernambuco: (A) 2004; (B) 2012.	83
Figura 37 – Diagrama de dispersão do EVI e média do total mensal de precipitação de Pernambuco normalizados: (A) 2004; (B) 2012.	83
Figura 38 – Média mensal do SAVI e média do total mensal de precipitação de Pernambuco: (A) 2004; (B) 2012.	84
Figura 39 – Diagrama de dispersão do SAVI e média do total mensal de precipitação de Pernambuco normalizados: (A) 2004; (B) 2012.	85
Figura 40 – Média mensal do NDWI e média do total mensal de precipitação de Pernambuco: (A) 2004; (B) 2012.	86
Figura 41 – Diagrama de dispersão do NDWI e média do total mensal de Pernambuco normalizados: (A) 2004; (B) 2012.	86
Figura 42 – Média mensal da temperatura da superfície e média do total mensal de precipitação de Pernambuco: (A) 2004; (B) 2012.	87
Figura 43 – Diagrama de dispersão da temperatura da superfície e média do total mensal de precipitação de Pernambuco normalizados: (A) 2004; (B) 2012.	88
Figura 44 – Sazonalidade do albedo da superfície para Pernambuco nos anos de 2004 e 2012.	89
Figura 45 – Sazonalidade do NDVI para Pernambuco nos anos de 2004 e 2012.	90
Figura 46 – Sazonalidade da temperatura da superfície (°C) para Pernambuco nos anos de 2004 e 2012.	91
Figura 47 - Correlograma dos parâmetros biofísicos de Pernambuco e grupos de precipitação (A) Albedo; (B) NDVI; (C) EVI; (D) SAVI; (E) NDWI; (F) Temperatura da Superfície.	93

Figura 48 – Parâmetros biofísicos de Pernambuco e grupos de precipitação entre 2000 até 2019: (A)Albedo; (B)NDVI; (C)EVI; (D)SAVI; (E)NDWI; (F)Temperatura da Superfície.	94
Figura 49 – Média mensal do albedo da superfície e precipitação nos grupos homogêneos nos anos extremos: 2004 (muito úmido) e 2012 (muito seco).	97
Figura 50 – Média mensal do NDVI e precipitação dos grupos homogêneos nos anos extremos: 2004 (muito úmido) e 2012 (muito seco).	97
Figura 51 – Média mensal do EVI e precipitação nos grupos homogêneos nos anos extremos: 2004 (muito úmido) e 2012 (muito seco).	98
Figura 52 – Média mensal do SAVI e precipitação nos grupos homogêneo nos anos extremos: 2004 (muito úmido) e 2012 (muito seco).	99
Figura 53 – Média mensal do NDWI e precipitação nos grupos homogêneo nos anos extremos: 2004 (muito úmido) e 2012 (muito seco).	100
Figura 54 – Média mensal da temperatura da superfície e precipitação nos grupos homogêneo nos anos extremos: 2004 (muito úmido) e 2012 (muito seco).	101
Figura 55 – Localização da Área Crítica em Pernambuco	103
Figura 56 – Áreas Afetadas por Desertificação em Pernambuco e na área crítica.	104
Figura 57 – Classificação Climática da Área Crítica.	105
Figura 58 – Classes de Uso e Cobertura da Terra pelo MAPBIOMAS nos anos de 2001 e 2018.	106
Figura 59 – Imagens de alta resolução espacial para detalhamento da cobertura do solo.	107
Figura 60 – Detalhamento do Albedo da superfície, SAVI e Temperatura à superfície da região crítica.	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de intensidade de Índice de Anomalia de Chuva (IAC)	35
Tabela 2 – Fatores e resolução das imagens dos produtos MODIS	37
Tabela 3 - Estatística descritiva da precipitação anual nos grupos formado pelo método de Ward.	44
Tabela 4 – Teste de normalidade e coeficiente de correlação de Pearson	46
Tabela 5 - Classificação dos anos com base no IAC para os anos 1987-2019.	48
Tabela 6 – Estatística do teste de Mann-Kendall com a redução dos pixels médio.	78
Tabela 7 – Coeficientes de correlação e método de correlação para os anos 2004 e 2012 entre albedo e precipitação	80
Tabela 8 – Coeficientes de correlação e método de correlação para os anos 2004 e 2015 entre o NDVI e precipitação.	82
Tabela 9 – Coeficientes de correlação e método de correlação para os anos 2004 e 2012 entre o EVI e precipitação.	84
Tabela 10 – Coeficientes de correlação e método de correlação para os anos 2004 e 2012 entre o SAVI e a precipitação.	85
Tabela 11 – Coeficientes de correlação e método de correlação para os anos 2004 e 2012 para o NDWI e precipitação.	87
Tabela 12 – Coeficientes de correlação e método de correlação para os anos 2004 e 2012 para a temperatura e precipitação	88
Tabela 13 – Análise da correlação dos parâmetros biofísicos dos grupos de precipitação anual com os valores médios dos parâmetros de Pernambuco	95
Tabela 14 – Análise tendência temporal de Mann-Kendall dos grupos homogêneos de precipitação	96
Tabela 15 – Correlação da média mensal dos parâmetros biofísicos com a precipitação mensal nos grupos homogêneos de precipitação	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Especificações técnicas do sensor MODIS	22
Quadro 2 – Produtos do Sensor MODIS para a superfície Terrestre	22
Quadro 3 - Especificações das bandas espectrais do MODIS	23
Quadro 4 – Nível de processamento dos produtos	24
Quadro 5 – Índices de vegetação obtidos por sensoriamento remoto	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Hipóteses	15
1.2 Objetivos	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 Mudanças Ambientais e Degradação Ambiental.....	17
2.2 Uso de Sensoriamento Remoto na Análise de Mudanças Ambientais.....	18
2.3 Processamento Digital em Nuvem (<i>Cloud Computing</i>)	20
2.4 Sensor MODIS	21
2.5 Sensor MODIS para estimativa de Parâmetros Biofísicos	24
2.5.1 Parâmetros Biofísicos.....	24
2.5.2 Escala Espaço-Temporal	28
2.5.3 Técnicas de Análise.....	29
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1 Área de estudo	31
3.2 Preparação do banco de dados.....	32
3.3 Análise de Agrupamento das Zonas Homogêneas	33
3.4 Índice de Anomalia de Chuva (IAC)	34
3.5 Dados de satélites.....	36
3.6. Parâmetros Biofísicos com Produtos MODIS	38
3.7 Análise dos Parâmetros Biofísicos	40
3.7.1 Análise de Tendência Temporal dos Parâmetros	40
3.7.2 Análise da Sazonalidade dos Parâmetros Biofísicos nos Anos de Precipitação Extrema	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1 Precipitação em Pernambuco.....	42
4.1.1 Análise hierárquica.....	42
4.1.2 Índice de Anomalia de Chuva	47
4.2 Parâmetros Biofísicos.....	49
4.2.1 Redutor média anual do Pixel	49
4.2.2 Redutor máxima anual do Pixel	62
4.2.3 Análise de Tendência Temporal dos Parâmetros Biofísicos.....	76
4.2.4 Sazonalidade dos Parâmetros Biofísicos de Pernambuco nos anos Extremos.....	79

4.2.5 Parâmetros Biofísicos por Zonas Homogêneas de Precipitação Anual	93
4.2.6 Sazonalidade dos Parâmetros Biofísicos por Zonas Homogêneas de Precipitação Anual nos Anos Extremos.....	97
4.3 Estudo de uma Área Crítica	102
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
APÊNDICE A - Lista dos Postos Pluviométricos com as respectivas coordenadas...	123
APÊNDICE B - Script do Google Earth Engine para a cálculo dos parâmetros biofísicos no MODIS, análise estatística e sazonalidade dos anos extremos.....	125

1. INTRODUÇÃO

O conflito entre a preservação ambiental e o desenvolvimento humano tem sido alvo de intensa discussão desde o final da década de 60 no século XX, a partir da qual surgiu a percepção da finitude dos recursos naturais para manutenção do progresso e desenvolvimento da sociedade global (CALEGARE; SILVA JÚNIOR, 2011). Com isso, passou-se a considerar o meio-ambiente como um dos fatores de promoção de bem-estar social, conforme a Avaliação Ecosistêmica do Milênio (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT - MEA, 2005).

O ecossistema é uma rede de elementos bióticos e abióticos que interagem entre si e são afetados por fatores ambientais e antrópicos. Com isso, busca-se compreender e valorizar os produtos e os serviços obtidos a partir dos ecossistemas, os chamados serviços ecossistêmicos, tais como alimentos, medicamentos e habitats para fauna. Nesse sentido, a modificação da superfície terrestre em nível local, nacional e internacional é um dos fatores que contribuem para mudanças nos ecossistemas (PARKER et al., 2003), provocando a degradação ambiental que pode prejudicar o fornecimento dos serviços ecossistêmicos.

Diante disso, quantificar e mapear as mudanças nos ecossistemas, com base em indicadores de processos biofísicos associado aos ambientes, é uma estratégia na tomada de decisão e ordenamento do território. Esse mapeamento apresenta alguns desafios técnicos e operacionais, mas quando realizado possibilita a diferenciação dos espaços com fornecimentos dos Serviços Ecosistêmicos mais intensos e os mais frágeis (GRÊT-REGAMEY et al., 2014; MALINGA et al., 2015; LE CLEC'H et al., 2016).

O monitoramento das condições ambientais pode ser feito com dados locais, mas esses não permitem compreender as mudanças em escala regional e, também, de difícil avaliação ao longo do tempo, portanto, são mais caros e menos práticos (NANZAD et al., 2019). Para superar esses problemas, o uso das geotecnologias, em especial o sensoriamento remoto, auxilia na compreensão das mudanças de uso e da cobertura da terra, levando ao entendimento das principais mudanças ambientais (SIDHU; PEBESMA; CÂMARA, 2018; ARAÚJO et al.; 2018).

Contudo, os produtos oriundos do sensoriamento remoto necessitam de equipamentos computacionais sofisticados para o seu processamento, em virtude de exigirem um consumo maior da memória desses dispositivos. Este é, portanto, um fator limitador para análises mais precisas dos produtos do sensoriamento remoto. Nesse contexto, destaca-se uma plataforma

de sensoriamento remoto orbital baseada na internet e fornecida pela Google, *Google Earth Engine*, que permite realizar o processamento digital de imagens de satélite de forma simultânea com armazenamento em nuvem, e ainda, analisar mapas temáticos em diferentes escalas espaciais e temporais em variadas coleções de imagens (GORELICK et al., 2017).

Na Região Nordeste do Brasil, diversos fatores ambientais e antrópicos regulam as condições ambientais, sendo a precipitação, entre os naturais, um dos elementos de maior efeito na região. Esse elemento é afetado por posição geográfica, relevo, características da superfície e sistema de tempo atuante, em que o período chuvoso na parte oeste da região ocorre entre os meses de janeiro a maio e, no setor leste, de abril a agosto. (MARENGO et al., 2011). Entre os estados da região, Pernambuco, junto com Rio Grande do Norte, possui maior extensão de clima semiárido (ALVARES et al., 2013).

Portanto, a compreensão das mudanças ambientais em Pernambuco e sua relação com fatores naturais e antrópicos pode orientar políticas públicas e sensibilizar as comunidades para preservação dos recursos naturais.

1.1 Hipóteses

O uso da plataforma de sensores orbitais baseado no processamento em nuvem, permite determinar a ocorrência de mudanças das formas de cobertura da terra em todo estado de Pernambuco capazes de alterar a dinâmica ambiental local e regional.

Os regimes extremos de precipitação pluviométrica provocam diferentes comportamentos no espaço e no tempo das formas de cobertura do solo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral:

- Verificar as mudanças ambientais espaço-temporais por meio de parâmetros biofísicos no estado de Pernambuco durante o período de 2000 a 2019 com uso de geotecnologias e processamento digital em nuvem.

1.2.2 Objetivos Específicos:

- Identificar as Zonas Homogêneas de Precipitação Anual em Pernambuco;
- Analisar a variabilidade de precipitação das Zonas Homogêneas com uso do índice de Anomalia de Chuva (IAC);
- Verificar dois critérios de redução de imagens para avaliação de variabilidade dos parâmetros biofísicos;
- Analisar a dinâmica espaço-temporal dos parâmetros biofísicos do estado de Pernambuco com produtos MODIS;
- Analisar a sazonalidade dos parâmetros biofísicos nos anos extremos de Precipitação;
- Analisar a dinâmica temporal e sazonalidade dos parâmetros biofísicos nas zonas homogêneas de precipitação anual e em anos extremos; e
- Desenvolver um estudo de caso em áreas consideradas críticas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse tópico, seguem alguns conceitos base para estruturação da tese. Para tanto, houve um detalhamento dos conceitos relacionados às mudanças ambientais, degradação ambiental, sensoriamento remoto, sensor MODIS e aplicações desse sensor no monitoramento ambiental.

2.1 Mudanças Ambientais e Degradação Ambiental

O meio-ambiente é composto por diferentes elementos, bióticos e abióticos, e essa sinergia confere um caráter dinâmico aos ecossistemas (DULLEY, 2004). Essa dinâmica torna os ecossistemas equilibrados e estáveis, podendo sofrer alguma alteração ríspida devido a algum fator externo a esse ambiente.

O ser humano faz parte desse sistema e, durante muito tempo, viveu em equilíbrio. Com o passar do tempo, foi percebendo que seria possível realizar algumas mudanças para melhor atender às suas necessidades. Essas mudanças na paisagem ou natureza, a depender de sua magnitude, podem ocasionar sérias modificações na sinergia dos ecossistemas. As mudanças promovidas na natureza, com intuito de aproveitar os recursos naturais disponíveis e de adequação às necessidades humanas, ocasionam consequências nas relações socioambientais, econômicas e culturais estabelecidas em escalas locais, regionais e até globais (TREVISAN, 2015).

Portanto, essas modificações das condições naturais geram novos usos e formas de ocupação da terra, ocasionando um comprometimento das funções ambientais em termos de “bens e serviços” fornecidos pelos ecossistemas (DE GROOT, 2013). Com isso, surge o conceito de degradação ambiental, que pode ser entendido como a perda da qualidade ambiental ou alteração negativa da característica do meio ambiente (BRASIL, 1981).

Dentro desse conceito de degradação ambiental, não há diferenciação entre a fonte causadora da degradação, se antrópica ou natural. Contudo, é sabido que as pressões humanas sobre os recursos naturais têm aumentado consideravelmente. As ações antrópicas mais consideráveis são os desmatamentos em áreas de nascentes e mata ciliar, queimadas, lançamentos de resíduos sólidos e líquidos, contaminação por produtos tóxicos agrícolas (ORTEGA, 2011).

Assim, enfrenta-se atualmente uma crise ambiental fruto da relação humana nociva com os recursos naturais (SANTOS; FERREIRA; FERREIRA, 2017). Apesar das intensas discussões sobre as consequências, como redução da disponibilidade hídrica, mudanças climáticas, eventos extremos e alteração da disponibilidade de alimentos, a humanidade permanece com o mesmo padrão de comportamento em relação aos recursos naturais.

Diante disso, é fundamental conhecer as mudanças ocorridas e verificar os impactos ambientais gerados ao longo do tempo. Com isso, é possível ajustar programas, projetos e políticas públicas mais condizentes à realidade.

2.2 Uso de Sensoriamento Remoto na Análise de Mudanças Ambientais

Com o desenvolvimento das atividades humanas, há uma modificação da paisagem e dos recursos naturais. Essas mudanças ocorrem principalmente pela falta de planejamento das atividades humanas e de gestão adequada dos impactos ambientais gerados, nos quais são consideradas as limitações dos sistemas naturais (NETO; FERNANDES, 2016). Assim, o uso descontrolado dos recursos naturais ocasiona os processos de degradação.

Essa degradação leva às alterações das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, da água e do ar (LEMOS FILHO; FERREIRA; LYRA, 2017), portanto, a dinâmica ambiental da região é alterada. Em condições climáticas específicas, essa alteração pode ser tão acentuada a ponto de não existir qualquer possibilidade de recuperação da dinâmica ambiental anterior.

Nesse sentido, as questões ambientais necessitam de dados espaciais confiáveis e de informações da ecologia da paisagem (BLASCHE; KUX, 2007) para realização do planejamento dos recursos naturais e adoção de medidas preventivas e de mitigação de impactos ambientais. É interessante destacar que a degradação causada gera mudanças na biomassa vegetal, ou cobertura vegetal, nas características da ocupação do solo e nas condições micrometeorológicas (XU et al., 2009), o que, por sua vez, altera a interação com energia eletromagnética. Assim, o registro da energia eletromagnética pode ser obtido por meio de sensores acoplados em diferentes veículos, o denominado sensoriamento remoto.

Inicialmente, é fundamental conceituar o termo sensoriamento remoto, pois isso permite compreender melhor como essa ferramenta auxilia na temática ambiental. As primeiras aplicações datam do século XIX, nos primórdios do uso da câmera fotográfica.

Desde então, o termo sensoriamento remoto vem evoluindo à medida em que as áreas de informática, eletrônica, física, entre outras ciências, evoluem.

Nos primeiros momentos de discussão da área, o termo ressaltou a falta de necessidade de contato físico para obtenção de informação, em seguida, complementou-se com a obtenção da informação com base na detecção e na medição das mudanças que um objeto gera sobre os campos de forças eletromagnéticas, acústicos ou potenciais (ELACHI, 1987).

Contudo, dentro do segmento espacial, os sensores utilizados verificam as mudanças ocorridas no campo eletromagnético, uma vez que essa energia não necessita de um meio de propagação. Portanto, em termos mais adequados, o sensoriamento remoto trata de uma área de conhecimento que analisa a condição da superfície terrestre com sensores que medem a energia eletromagnética (NOVO, 2008). Florenzano (2007) concorda e complementa que o sensoriamento remoto permite obter imagens e outros dados sobre a superfície terrestre a partir da energia refletida ou emitida pelos objetos.

Qualquer corpo acima de 0 K está constantemente absorvendo, refletindo e emitindo energia eletromagnética (LORENZZETTI, 2015). As magnitudes e características das energias refletidas e emitidas por um objeto que são captadas por sensores identificam esses objetos. A coleta dessas imagens ou da energia refletida é feita por meio de câmeras ou sensores a bordo de satélites orbitais ou aeronaves, tripuladas ou não.

Tratando especificamente dos satélites, estes possuem um conjunto de lentes em vários comprimentos de ondas eletromagnéticas e visualizam cada parte da superfície terrestre. Entre essas lentes existem alguns sensores que captam a energia refletida ou emitida da superfície em diferentes faixas do espectro eletromagnético (LIU, 2015).

Além disso, as imagens registradas pelos sistemas de sensores possuem como saída uma imagem digital. Essa imagem pode ser processada com intuito de realçar ou extrair informações específicas (NOVO, 2007). Esse processamento pode ser feito pela composição colorida com diferentes bandas espectrais, uma combinação da mesma cena em intervalos de tempo diferentes, pela comparação de diferentes sensores ou pela obtenção de novas informações, como a geração de índices. Por fim, o processamento ainda realiza redução de erros ou ruídos inerentes do processo de obtenção da informação.

Em suma, o sensoriamento remoto é uma ferramenta fundamental para problemática ambiental, uma vez que as alterações ambientais ocorrem com uma dinâmica bastante rápida.

Dessa maneira, essa tecnologia permite realizar o acompanhamento contínuo da superfície terrestre em escalas espaço-temporais variáveis e com baixo custo de obtenção e operacional.

2.3 Processamento Digital em Nuvem (*Cloud Computing*)

Recentemente, a Google, gigante do setor de tecnologias, desenvolveu uma plataforma que possibilita visualizar e examinar dados espaciais nomeada de *Earth Engine*, que contém um catálogo de informações, de ordem multi-petabyte (GORELICK et al., 2017). Essa plataforma possui diferentes bibliotecas com os mais variados dados e com coleção de imagens, possibilitando o processamento deles nos servidores da empresa. Com isso, geram-se duas vantagens primordiais: visualização de grandes quantidades de dados e velocidade no processamento das imagens.

O acesso à plataforma em questão é feito no próprio navegador de internet e baseia-se em uma interface para aplicação de programação (API – *Application Programming Interface*). Em seu ambiente, há uma biblioteca de comandos e operações pré-definidas que possibilita a melhor gestão, processamento e análise das informações disponíveis. As aplicações dessa plataforma em estudos ambientais com sensoriamento remoto ainda são relativamente recentes, com os primeiros estudos realizados no ano de 2014, publicações em conferências e um estudo de Patel et al. (2015), que avaliaram o uso da plataforma para identificação de áreas urbanas com imagens do sensor TM/Landsat.

Após o ano de 2015, diversas aplicações começaram a ser realizadas nas mais diferentes áreas de conhecimento e regiões do planeta. No Brasil, destacam-se os estudos de Kalacska et al. (2019), os quais realizaram uma classificação multi-temporal na Bacia do Rio Xingu, usando imagens do sensor TM/Landsat 5 e OLI/Landsat 8, para identificar as dinâmicas de cobertura do solo e auxiliar a compreensão das pressões antrópicas na região de interesse ambiental. Por sua vez, outros estudos buscaram analisar as dinâmicas de ocupação de pastagens e a degradação dessas áreas usando a coleção de imagens do sensor MODIS (PARENTE; FERREIRA, 2018; PEREIRA et al., 2018).

Estudos desenvolvidos com essa plataforma na Região Nordeste ainda são escassos, mas se destaca o estudo desenvolvido por Goldblatt, Ballesteros e Burney (2017) que aplicaram o uso de imagens com alta resolução espacial do satélite *WorldView* para classificação de áreas semiáridas. Os resultados sugerem a viabilidade desse produto como forma de classificação das formas de cobertura do solo.

Os resultados obtidos nos trabalhos desenvolvidos ressaltam as vantagens dessa tecnologia para processamento de grandes quantidades de informações, possibilitando maior confiança nos resultados obtidos. Além disso, há uma margem significativa de aplicações e estudos nas regiões brasileiras, em especial, no Nordeste.

2.4 Sensor MODIS

Entre os diferentes conjuntos de satélites e sensores em funcionamento, o MODIS se destaca em função das diferentes aplicações nas mais diferentes áreas de conhecimento. O sensor MODIS está presente nos satélites TERRA e AQUA e ambos pertencem ao programa de pesquisas de observação espacial do *Earth Observing System* (EOS), financiado pela *NASA Earth Science Enterprises* (ESE) (RUDORFF; SHIMABUKURO; CEBALLOS, 2007). Esse programa tem como meta principal a determinação das mudanças do planeta e as consequências das ações antrópicas na natureza. Dessa forma, é realizado um monitoramento global permanente que permite entender as mudanças globais.

O satélite TERRA é um projeto de pesquisa que fornece dados globais do planeta e as interações e possui cinco (5) sensores a bordo: ASTER, CERES, MISR, MOPITT e MODIS. Em órbita desde 18 de dezembro de 1999, passa pela linha do Equador no horário próximo às 10h30min, sua coleta de dados foi iniciada em fevereiro de 2000.

Por sua vez, o satélite AQUA possui como objetivo analisar a precipitação evapotranspiração e ciclo da água, possui seis (6) sensores a bordo: AIRS, AMSR-E, AMSU-A, CERES, HSB e MODIS. Esse satélite foi lançado em 02 de maio de 2002 e passa pela linha do Equador no horário aproximado das 13h30min, cuja coleta de dados iniciou em julho de 2002.

No que tange o sensor MODIS, esse equipamento busca atender três áreas de estudos: atmosfera, oceano e terra, com bandas de resolução espacial e espectral selecionadas para diversas necessidades, oferecendo dados diariamente (JUSTICE et al., 2002). As especificações do MODIS estão disponíveis no Quadro 1 e as especificações das bandas espectrais estão disponíveis no Quadro 2. O Quadro 3 apresenta os produtos ligados à superfície terrestre e o quadro 4 informa os níveis de processamento.

Quadro 1 - Especificações técnicas do sensor MODIS

Órbita	Heliosíncrona, polar, 705 km; 10h30min a.m. descendente; 1h30min p.m. ascendente
Alcance Espectral	0.4-14.4 μm
Cobertura Espectral	+/- 55°, 2330 km em fileira (“scans” contínuos em nadir no Equador)
Resolução Espacial	250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas), 1000 m (29 bandas) em nadir
Precisão Radiométrica	5% absoluto, < 3 μm ; 1% absoluto > 3 μm ; 2% de reflectância
Cobertura de repetição	Diária, a norte da latitude 30° e a cada dois dias, para latitudes inferiores a 30°
Quantização	12 bits
Taxa de Dados	6.2 Mbps (média), 10.8 Mbps (dia), 2.5 Mbps (noite)
Força	162.5 W (média para uma órbita), 168.5 W (pico)

Fonte: EMBRAPA (2020) Disponível em:

https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/sensores_operantes.html

Quadro 2 – Produtos do Sensor MODIS para a superfície Terrestre

Terra	
MOD09/MYD09	Reflectância da Superfície
MOD11/MYD11	Temperatura e Emissividade da superfície terrestre
MOD21/MYD21	Emissividade da superfície terrestre (Novo)
MCD12	Cobertura da Terra/Mudança da Cobertura da terra
MOD13/MYD13	Índices de Vegetação (NDVI e EVI)
MOD14/MYD14	Anomalias termais, fogos e queimadas
MOD15MYD15	Índice de área foliar e FPAR
MOD16/MYD16	Evapotranspiração
MOD17/MYD17	Fotossíntese líquida e Produtividade primária
MCD43	Distribuição Bidirecional de Refletância Função e Albedo
MOD44B	Campo de Vegetação Contínua
MDC46	Área Queimada
MOD44W	Máscara de Água

Fonte: NASA (2020)

(<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/>)

Quadro 3 - Especificações das bandas espectrais do MODIS

Especificações das bandas 1 - 19				
Uso Primário	Banda	Largura de Banda (nm)	Resolução Espacial	SNR*
Superfície Terrestre/Nuvem	1	620-670	250	128
	2	841-875	250	201
Propriedades da Superfície/Nuvem	3	459-479	500	243
	4	545-565	500	228
	5	1230-1250	500	74
	6	1628-1652	500	275
	7	2105-2155	500	110
Cor dos Oceanos/Fitoplâncton/Bioquímica	8	405-420	1000	880
	9	438-448	1000	838
	10	483-493	1000	802
	11	526-536	1000	754
	12	546-556	1000	750
	13	662-672	1000	910
	14	673-683	1000	1087
	15	743-753	1000	586
Vapor d'água Atmosférico	16	862-877	1000	516
	17	890-920	1000	167
	18	931-941	1000	57
19	915-965	1000	250	
Especificações das bandas 20 - 36				
Uso Primário	Banda	Largura de Banda (nm)	Resolução Espacial	NEDT*
Temperatura nuvens/Superfície	20	3660-3840	1000	0,05
	21	3929-3989	1000	2
	22	3929-3989	1000	0,07
	23	4020-4080	1000	0,07
Temperatura Atmosférica	24	4433-4498	1000	0,25
	25	4482-4549	1000	0,25
Cirrus	26	1360-1390	1000	150
Vapor d'água	27	6535-6895	1000	0,25
	28	7175-7475	1000	0,25
	29	8400-8700	1000	0,5
Ozônio	30	9580-9880	1000	0,25
Temperatura Nuvens/Superfície	31	10780-11280	1000	0,25
	32	11770-12270	1000	0,25
Altitude Topo da Nuvem	33	13185-13485	1000	0,25
	34	13485-13785	1000	0,25
	35	13785-14085	1000	0,25
	36	14085-14385	1000	0,35

SNR: "Signal-noise ratio"; NEDT: "Noise-equivalent temperature difference"

Fonte: EMBRAPA (2020). Disponível em:

https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/sensores_operantes.html

Quadro 4 – Nível de processamento dos produtos

Nível	Definição
0	Dados brutos reconstruídos na resolução total, todas as informações de comunicação removidas (sem formato específico-12bits).
1	Dados de nível 0 são referenciados pela hora e adicionados informações subsidiárias, incluindo coeficientes de calibração geométrica e radiométrica, e informação de geolocalização (HDF).
2	Variáveis geofísicas derivadas na mesma resolução e localização dos dados de nível 1.
3	Variáveis “mapeadas” em grades de espaçamento uniforme, normalmente completa e consistente
4	Saídas de modelo ou resultados de análises dos dados de níveis mais baixos

Fonte: NASA (2020). Disponível em: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/>

Alguns desses produtos apresentam resoluções espaciais de 250, 500 e 1000 m. Os satélites passam de 1 a 2 dias pela superfície terrestre e alguns produtos fazem uma composição de 8 (oito) e 16 (dezesesseis) dias, outros mensais e anuais, a depender do produto e nível de processamento, sendo essa composição feita a partir da menor cobertura de nuvens possível, baixo ângulo de visada e o maior valor (DIDAN et al., 2015).

2.5 Sensor MODIS para estimativa de Parâmetros Biofísicos

A superfície terrestre possui uma resposta rápida aos eventos meteorológicos, dessa forma, a dinâmica é alta e potencializada pelas atividades antrópicas. Portanto, as pesquisas para compreensão das mudanças ambientais apresentam uma variedade de parâmetros biofísicos, escalas espaciais e temporais e técnicas de análise, a depender da finalidade. No intuito de entender melhor cada aspecto, essa seção foi dividida nos seguintes tópicos: Parâmetros Biofísicos, Escala Espaço-Temporal e Técnicas de Análise.

2.5.1 Parâmetros Biofísicos

A superfície terrestre é composta por diferentes elementos, entre eles: vegetação, solo, micro-organismos, entre outros; que interagem entre si formando o ecossistema. As estruturas das coberturas das terras, a superfície terrestre, respondem de maneiras diferentes à radiação eletromagnética solar e resulta em diferentes trocas de energia, portanto, esse conhecimento pode auxiliar na identificação e monitoramento das suas condições físico-químicas e biológicas (PADOVANNI et al., 2018). Assim, parâmetros biofísicos, variáveis

que indicam o tipo de estrutura e condição biológica – tipo e estrutura da vegetação – e física – o tipo e cobertura do solo-, são utilizados para as pesquisas de mudanças ambientais.

Visando ao monitoramento das mudanças ambientais, diferentes indicadores podem ser usados na avaliação da condição da vegetação e superfície (ZHANG; OKIN; ZHOU, 2019). Diferentes índices biofísicos podem ser aplicados e, para o monitoramento da condição da vegetação, o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), ou Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN), é o mais utilizado (ARAÚJO et al., 2018; ECKERT et al., 2015; HOUSPANOSSIAN et al., 2017; SOUZA et al., 2014; ZOUNGRANA et al., 2018), sendo os produtos usados nesses estudos MOD13 e MYD13, que já fornecem os índices de vegetação. Outro produto MODIS utilizado em análises da superfície terrestre corresponde ao MOD09, o qual fornece as reflectâncias em 7 bandas espectrais e, com base nos produtos da reflectância do vermelho e infravermelho, calcula-se o NDVI.

Outro índice bastante utilizado é *Enhanced Vegetation Index* (EVI), desenvolvido para as regiões com alta biomassa, a exemplo das Florestas Tropicais. Mas esse parâmetro também reduz a influência das condições atmosféricas (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012). Alguns estudos aplicaram esse índice em áreas com vegetação nativa do Cerrado ou área de transição entre Cerrado/Caatinga (BORGES; SANO, 2014; NERY et al., 2014), usando o produto MOD13 nesses trabalhos.

Um terceiro índice de vegetação utilizado é o *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), ou Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS), que tem sido amplamente utilizado especialmente em regiões semiáridas. O SAVI busca identificar a resposta vegetativa da superfície, minimizando o efeito da resposta espectral do solo (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012). Para tanto, esse índice costuma usar um fator de ajuste “L” para reduzir o efeito do solo na radiação eletromagnética, sendo essa característica interessante para regiões semiáridas, pois estas apresentam uma vegetação mais esparsa e o solo mais exposto.

No fator de ajuste “L”, para o Valor em áreas com cobertura vegetal de forma intermediária atribui-se 0,5. Nas áreas com vegetação mais adensada utiliza-se 0,25 e, para um valor de L igual a zero, o SAVI torna-se semelhante ao NDVI, não sendo necessário o devido ajuste (HUETE, 1988; ALLEN et al., 2007). Vale destacar que região do Semiárido Brasileiro alguns estudos utilizaram o fator de ajuste no valor de 0,5 (SILVA & GALVÍNCIO, 2012; SILVA et al., 2019; BATISTA et al., 2020).

Contudo, nessas regiões, quando utilizado o MODIS, poucos estudos empregaram o SAVI. Alves et al. (2014) fizeram essa aplicação em uma bacia hidrográfica e analisaram em conjunto com dados NDVI e Albedo, todos obtidos a partir do produto MOD09, com o objetivo de identificar o comportamento sazonal desses índices na área de estudo.

Provavelmente, o pouco uso do SAVI em regiões semiáridas se deve à necessidade de obtenção do produto MOD09 seguido do processamento das imagens. Dessa forma, aumenta-se o tempo de processamento e a suscetibilidade a erros. Devido ao fato de o produto do MODIS para a vegetação, MOD13, já disponibilizar o NDVI e EVI, que são índices que também respondem adequadamente às análises desejadas, os estudos tendem a utilizar mais esses últimos dois índices.

Outro índice com diferentes aplicações é *Normalized Difference Water Index* (NDWI), ou Índice de Água da Diferença Normalizada (IADN), proposto por Gao (1996), que avalia o teor de água das folhas e usa as faixas da radiação eletromagnética no infravermelho, uma banda centrada em aproximadamente 0,86 μm e outra em 1,24 μm . Os estudos em regiões semiáridas com esse parâmetro buscam monitorar a estrutura da cobertura vegetal, o estresse hídrico da vegetação e estimativas da quantidade de água nas plantas (RIBEIRO *et al.*, 2015), usando o produto das reflectâncias - MOD09.

A depender do tipo de cobertura da terra, se prevalece a vegetação, solo exposto ou áreas edificadas, a radiação proveniente do sistema solar é refletida em proporções diferentes. Essa taxa de refletividade da radiação denomina-se Albedo. Em caso de desmatamento e aumento do solo exposto, o valor do albedo aumenta, enquanto que a umidade do solo e a densidade da vegetação diminuem (ROBINOVE *et al.*, 1981).

O MODIS possui um produto, MDC43, que fornece os valores de albedo para diferentes bandas, além do *Albedo Black Sky*: condição de iluminação direta; *Albedo White Sky*: condição de iluminação difusa. Outra possibilidade, para obtenção do Albedo, é sua determinação a partir do produto de reflectância (MOD9) e do emprego de pesos para cada banda para o cálculo (LIANG, 2000; TASUMI; ALLEN; TREZZA, 2008).

O Albedo é um parâmetro biofísico que auxilia a entender a estrutura física da superfície. Em geral, ele é utilizado com outros índices de vegetação (NDVI, EVI e SAVI) e Temperatura da superfície (MATOS; CANDEIAS; TAVARES JUNIOR, 2013; SANTOS *et al.*, 2017a). Diferentes estudos detectaram as relações inversas do Albedo com o índice de vegetação e a relação direta com a temperatura, portanto, a retirada da vegetação favorece o aumento do Albedo, que altera o saldo de radiação na superfície.

Houspanossian et al. (2017) alertam que a alteração do balanço de energia, seja nas ondas longas ou curtas, pode afetar também o clima atmosférico mais complexo, com diminuição de nuvens em áreas úmidas e aumento da evapotranspiração em regiões semiáridas e áridas. Dessa forma, outros estudos avaliaram o Saldo de Radiação e a Evapotranspiração Real, que são parâmetros regulados pelo tipo de cobertura da superfície e analisados em conjunto com os outros parâmetros biofísicos (SANTOS *et al.*, 2017b)

Ainda sobre a Evapotranspiração, um parâmetro dependente do saldo de radiação mas que tem influência sobre o ciclo hidrológico e disponibilidade hídrica, alguns estudos mais recentes têm buscado compreender melhor seu comportamento, pois o produto MOD16 fornece a evapotranspiração diária. Além disso, esses estudos têm associado a evapotranspiração à produtividade primária bruta (MOD17), isto é, compreender o balanço de carbono associado ao balanço hídrico por meio do indicador de Eficiência de Uso Da Água No Ecossistema, ou *Ecosystem Water Use Efficiency* (WUE).

Entre os estudos dessa área, destaca-se o de Hu e Jia (2015), que desenvolveram um modelo híbrido de estimativa de evapotranspiração real diária em uma bacia hidrográfica na China, denominado Etmonitor. Por sua vez, Tang *et al.* (2017) avaliaram a sazonalidade da evapotranspiração, a produtividade primária bruta e o WUE com os produtos MODIS e propuseram modelos alternativos para melhoria da estimativa.

A temperatura da superfície terrestre é um outro parâmetro utilizado e serve como indicador do saldo de energia na superfície, devido ao fato de ser um elemento chave na física dos processos da superfície em escalas regionais e globais (CUNHA et al., 2015). Portanto, os estudos com esse parâmetro acompanham outras variáveis, como Albedo e Cobertura Vegetal, o que permite realizar inferências da estrutura física da cobertura do solo. Quanto menor a cobertura vegetal, maior é a Temperatura da Superfície e o produto desse parâmetro no MODIS é MOD11.

Além da identificação das mudanças ambientais, ocasionada pelas modificações da cobertura da terra, esses parâmetros biofísicos também são usados para monitoramento da seca, comum nas regiões semiáridas. A seca é um evento climático que pode ocorrer em qualquer regime climático devido às irregularidades da precipitação e tem consequências ao meio ambiente e aos seres humanos. Em estudo desenvolvido por Cunha *et al.* (2015), usou-se o *Vegetation Supply Water Index* (VSWI), ou Índice de Água de Abastecimento para Vegetação, (IAAV), que é derivado dos índices de vegetação (NDVI) e da temperatura da superfície terrestre, para monitoramento das secas na região semiárida do Nordeste brasileiro.

Enquanto Nanzad et al. (2019) utilizaram a anomalia do NDVI e a correlacionaram com a precipitação e a temperatura na Mongólia entre os anos de 2000 e 2016.

As regiões semiáridas também apresentam uma maior propensão aos processos de desertificação, que seria um estado mais avançado de degradação dos solos ocasionado pelas condições climáticas adversas, como as severas secas, processo que é acelerado pelas atividades antrópicas. As consequências da desertificação afetam as dimensões sociais, econômicas e ambientais do ecossistema. No Nordeste do Brasil, um estudo de Tomasella et al. (2018) aplicou os produtos NDVI do MODIS (MOD13) para identificar áreas mais degradadas no período de 2000 até 2016.

Por sua vez, Mariano et al. (2018) buscaram identificar tendências de anomalias na biomassa como indicador de degradação de terras na região Nordeste do Brasil. Os autores puderam concluir que a estiagem leva à tendência de indicar áreas com propensão à degradação da terra e serve de alerta às autoridades para a necessidade de maior cuidado na mitigação da degradação e dos efeitos da estiagem tanto nos núcleos de desertificação quanto em novas áreas propensas à degradação.

2.5.2 Escala Espaço-Temporal

Ao analisar os estudos desenvolvidos, percebe-se que, inicialmente, as áreas de avaliação se limitavam a bacia hidrográficas, microrregiões e mesorregiões. Além disso, esses estudos usavam datas específicas para determinar os parâmetros biofísicos desejados durante um certo período de avaliação e as escolhas das datas se baseava na escolha de imagens com menor presença de nuvens. Os resultados apresentaram um panorama geral das mudanças ocorridas nos locais de estudo, contudo, a presença de nuvens ocasionava algum tipo de contaminação nas imagens, mesmo que mínima.

Por outro lado, as análises mais recentes com os produtos MODIS têm sido mais regionais, em especial em toda a região do Nordeste Brasileiro (CUNHA et al., 2015; TOMASELLA et al., 2018) ou em nível estadual, como Souza et al. (2015) que avaliaram o estado da Paraíba. Merecem também destaque Nanzad et al. (2019) que avaliaram toda a Mongólia, Houspanossian et al. (2017) que analisaram a região semiárida de Chaco, entre os países da Argentina, Paraguai e Bolívia, bem como Zoungrana et al. (2018) que verificaram a tendência de resposta do NDVI em Burkina Faso, região oeste da África.

Esses estudos também utilizam uma base de imagens maior, formada por todas as imagens disponíveis nos respectivos períodos de avaliação. Schucknecht et al. (2013) recomendam o uso de séries temporais, no lugar de imagens únicas, com o intuito de compreender a variabilidade inerente da vegetação e como a degradação da terra pode estar ocorrendo.

2.5.3 Técnicas de Análise

Para analisar as mudanças ocorridas em uma região, alguns estudos priorizam o uso de uma estatística descritiva da imagem e a comparação dos valores de pontos em diferentes áreas de uso e ocupação do solo (MATOS; CANDEIAS; TAVARES JUNIOR, 2013; RIBEIRO et al., 2015; SANTOS et al., 2014; SOUZA et al., 2014). Esses estudos encontraram, para áreas de caatinga, valores médios do Índice de Vegetação (NDVI) na variação entre 0,2 e 0,7, por ser uma vegetação dependente da precipitação. Enquanto o albedo apresentou um valor próximo 0,16, mas variando de 0,11 até 0,2. Por sua vez, a temperatura da superfície tem uma dependência maior do satélite utilizado, se TERRA ou AQUA, uma vez que os tempos de passagem são diferentes. Contudo, a temperatura da superfície ficou na faixa de 30 até 40 °C.

Outras pesquisas tiveram o intuito de validar os dados obtidos por sensoriamento remoto com dados de verdade terrestre e se valerem, além das análises anteriores (estatística descritiva), de uma avaliação da precisão e da acurácia dos modelos. Um exemplo é Santos et al. (2017a) que avaliaram o saldo de radiação e albedo em duas áreas experimentais de Caatinga: em Recuperação e Degradada. Para análise dos resultados obtidos com sensoriamento remoto, eles aplicaram Erro Médio Percentual (EMP), Erro Médio Absoluto (EMA), Erro Absoluto (EA) e Erro Percentual (EP), além de uma análise de regressão e teste *t-Student* para determinar a significação das correlações. Ao final, constaram a eficácia dos produtos de Albedo, sendo o resultado obtido pelo MCD43 mais satisfatório que o albedo calculado pelo MOD09 para as duas áreas.

O uso da estatística descritiva das imagens e a análise dos valores individuais dos pixels são análises adequadas para verificar o comportamento dos parâmetros biofísicos em datas específicas. Essas atividades requerem um baixo processamento computacional e análises estatísticas menos sofisticadas, contudo essas análises não são eficazes para compreender as tendências de mudanças de longo prazo, as mudanças graduais e abruptas da

cobertura da terra. Diante disso, uma abordagem diferente deve ser feita e Eastman et al. (2009) propuseram um procedimento para análises das tendências ambientais em séries temporais de produtos oriundos do sensoriamento remoto.

Com a melhoria da capacidade de processamento de imagens e maior acesso a programas mais robustos, as pesquisas têm aplicado o uso de análise de tendências temporais a uma coleção de produtos do sensoriamento remoto. Entre as técnicas mais utilizadas, se destacam o teste de tendência de Mann-Kendall e a regressão linear entre parâmetros biofísicos com o tempo.

A visualização da cartografia temática dos parâmetros, independentemente do tipo de análise escolhida, auxilia a entender os pontos mais críticos e as mudanças ocorridas, sendo comum a todos os estudos.

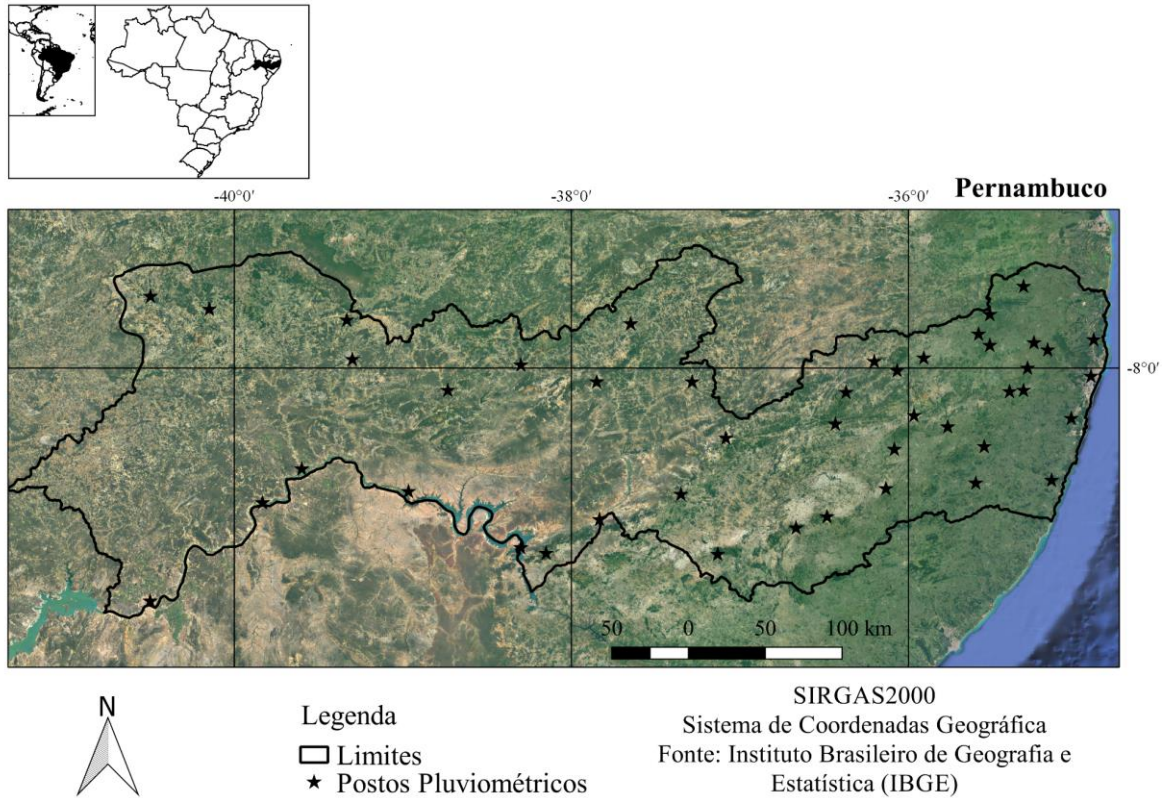
3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo avaliou o comportamento em todo estado de Pernambuco, considerando todo território estadual e as zonas homogêneas de precipitação anual com a premissa que alterações nas modificações do uso e da ocupação da superfície terrestre mudam as respostas da estatística das imagens, em especial a média, para cada parâmetro biofísico avaliado. Ao final, com a detecção de áreas críticas, uma análise mais detalhada da característica da superfície terrestre foi desenvolvida. Para tanto, os dados referentes às condições de cobertura vegetal, classificação climática e áreas afetadas por desertificação, provenientes do IBGE, e imagens de classificação de cobertura do solo da plataforma MAPBIOMAS bem como imagens com alta resolução espacial do *Google Earth pro*® foram utilizados para essa finalidade.

3.1 Área de estudo

A pesquisa foi conduzida no estado de Pernambuco, localizado na Região Nordeste. Pernambuco tem seu extremo norte a 7°15'45" Sul e extremo sul a 9°28'18" Sul, já no sentido de leste a oeste compreende 34°48'33" Oeste até 41°19'54" Oeste. Para auxiliar na compreensão das mudanças, foram obtidos dados meteorológicos junto às estações espalhadas no estado. Essas estações são pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da Agência Pernambucana de Água e Clima (APAC) e da Agência Nacional de Água (ANA). A lista está disponível no Apêndice A.

Figura 1 - Mapa de Localização de Pernambuco e Postos Pluviométricos.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

3.2 Preparação do banco de dados

Inicialmente foram obtidos os dados de precipitação para o período de janeiro de 1987 a 2019. A análise da precipitação foi realizada em 45 estações espalhadas na área de estudo (Figura 1), das quais foram obtidos os valores mensais e, em seguida, calculou-se o valor anual.

Para o preenchimento das falhas dos dados, foi utilizado o método do vetor regional, desenvolvido por Hiez (1977) e aprimorado por Brunet-Monet (1979). Este método se baseia em uma série cronológica de índices pluviométricos, que tem origem em uma extração por meio do método estatístico de máxima verossimilhança das informações dos dados dos postos estudados. Como bem descreve Tucci (2009), esses valores são únicos para uma região e são representados por dois vetores ótimos L (vetor regional coluna com “ n ” linhas) e C (vetor linha com “ m ” colunas) que formam uma matriz P de observações de m postos em n anos (ou meses). A estimativa de precipitação P no ano ou mês “ i ” na estação “ j ” é dada pela Equação 1.

$$\text{Eq. (1)} P_{ij} = L_i * C_i: \quad \text{eq.1}$$

Após os preenchimentos das falhas, realizou-se a análise de consistência dos dados para certificar a coerência da etapa anterior. O método utilizado foi da dupla massa desenvolvido pelo *Geological Survey* (USA). O método consiste em selecionar os dados de postos de uma região, acumular para cada um deles os valores mensais ou anuais, em seguida, plotar num gráfico cartesiano os valores acumulados correspondentes a consistir no eixo Y e de um outro posto confiável adotado para comparação no eixo X (TUCCI, 2009).

3.3 Análise de Agrupamento das Zonas Homogêneas

Para determinação das zonas homogêneas de precipitação, foi utilizado o intervalo de 1987 a 2019 em nível anual, normalmente, a primeira etapa seria a normalização, contudo, por ser uma escala anual, em que os resultados acumulados têm a mesma grandeza, essa etapa não se fez necessária (DOURADO; OLIVEIRA; AVILA, 2013). Para categorização dos municípios, utilizou-se a técnica de classificação em categorias similares por meio do agrupamento (*cluster*) na qual a medida de dissimilaridade escolhida foi a distância euclidiana. Existem duas formas para classificação, o método hierárquico e não hierárquico, nesse estudo utilizou-se o primeiro.

Na classificação hierárquica, o critério de agrupamento foi o método Ward (1963), que permite criar grupos, minimizando as dissimilaridades ou minimizando o quadrado da soma total dentro de cada grupo, demonstrado por meio de dendrogramas. Esse procedimento é interessante por produzir agregados com aproximadamente o mesmo número de observações (HAIR et al., 2009). A similaridade dentro dos grupos serviu para determinar a quantidade de grupos. A estatística multivariada foi calculada no R versão 3.4.1 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019), em ambiente de desenvolvimento integrado Rstudio com uso dos pacotes Mvar.

Após a realização das zonas homogêneas, a comparação da estatística descritiva (média, desvio-padrão, coeficiente de variação, máximo e mínimo) ao longo do período estudado, 1987 até 2019, serviu para compreender as características de cada um. Com base nas características dos grupos homogêneos, foram investigadas quais as variáveis que influenciaram a separação das zonas. Nesse sentido, os efeitos da orografia e das brisas

marítimas foram analisados com base em três características fisiográficas: Altitude, Declividade e Distância do litoral.

Com o intuito de determinar os efeitos na precipitação, os dados de precipitação, que foram obtidos em nível mensal, foram acumulados ao ano e, ao final, obteve-se a média anual de precipitação de cada posto. Por sua vez, as informações de altitude e declividade foram oriundas do projeto Topodata (VALERIANO; ROSSETTI, 2012), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a partir dos dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), que possui resolução espacial de 30 m.

Para obtenção das informações das características fisiográficas, os dados de altitude e declividade foram obtidos com os valores dos pixels disponíveis na imagem na área do posto, e a distância do mar foi referente à medida perpendicular do posto até o litoral, sendo essas etapas realizadas no QGIS.

Para testar o efeito de cada característica na precipitação, inicialmente, verificou-se a normalidade das variáveis, através do Teste de Shapiro-Wilk, e, em seguida, realizou-se uma análise da correlação, testada a significância ao nível de 5%. Nas situações que os parâmetros apresentaram uma distribuição normal, houve a aplicação da correlação de Pearson, que quantifica a força de associação linear entre duas (SANTOS et al., 2017b).

Nas situações em que um dos parâmetros não apresentou uma distribuição normal, foi realizada a correlação pelo coeficiente de correlação de Kendall, conhecido como τ (tau) de Kendall. Esse coeficiente possui a vantagem de ser generalizado para um coeficiente parcial e não é influenciado pela variância ou *outliers* (SALVADOR, 2014). A significância das correlações foram testadas T- Student (SOUZA et al., 2014).

3.4 Índice de Anomalia de Chuva (IAC)

Após o agrupamento dos postos e a definição das áreas homogêneas, foi analisada a variação do regime de precipitação por meio da técnica de Índice de Anomalia de Chuva (IAC). Essa técnica permite monitorar a variabilidade do espaço-temporal e comparar as condições vigentes com os valores históricos, possibilitando encontrar os anos considerados úmidos e secos (RIBEIRO, 2016).

Como vantagem, esse índice apresenta a facilidade computacional de realização e o desempenho estatístico próximo de outros índices mais sofisticados, como Palmer e Bhalme & Mooley. O Índice de Anomalia de Chuva (IAC), ou *Rainfall Anomaly Index* (RAI),

proposto por Rooy (1965) utiliza a precipitação anual e compara o desvio em relação à condição normal. Para tanto, são utilizadas as Equações 2 e 3, as quais consideram anomalias positivas os valores acima da média, e anomalias negativas os valores abaixo da média.

$$IAC = 3 * \left[\frac{N - N_{med}}{M_{med} - N_{med}} \right], \text{ para anomalias positivas} \quad \text{eq.2}$$

$$IAC = -3 * \left[\frac{N - N_{med}}{X_{med} - N_{med}} \right], \text{ para anomalias negativas} \quad \text{eq.3}$$

Em que,

N = Precipitação Anual Atual (mm);

N_{med} = Precipitação média anual da série histórica (mm);

M_{med} = Média das dez maiores precipitações anuais da série histórica (mm);

X_{med} = Média das dez menores precipitações anuais da série histórica.

Esse índice assume que a distribuição da precipitação segue um modelo normal e os desvios, ou anomalias, são referentes à distribuição do posto estudado. Portanto, considera-se seco ou úmido em relação aos dados históricos do posto e não em relação à uma condição global. Contudo, com os dados obtidos do IAC, é possível ordenar conforme classificação de Freitas (2004) e Freitas (2005) para anos secos e úmidos, com base na proposta de Rooy (1965), Tabela 1. Com isso, foi possível averiguar os períodos secos e úmidos no estado e determinar as tendências e mudanças ocorridas. Isso auxiliou a compreensão das mudanças dos parâmetros biofísicos. Após realizado o agrupamento dos postos, na etapa anterior, conforme análise multivariada, e determinado os Índices de Anomalia de Chuva (IAC) de cada posto, verificaram-se as classes de intensidade dos Índices de Anomalia de Chuva de cada grupo (Tabela 1).

Tabela 1 – Classes de intensidade de Índice de Anomalia de Chuva (IAC)

Faixa de IAC	Classe de Intensidade
IAC > 4	Extremamente úmido
2 < IAC < 4	Muito úmido
0 < IAC < 2	Úmido
-2 < IAC < 0	Seco
-4 < IAC < -2	Muito seco
IAC < -4	Extremamente seco

Fonte: Araújo, Moraes Neto e Souza (2009).

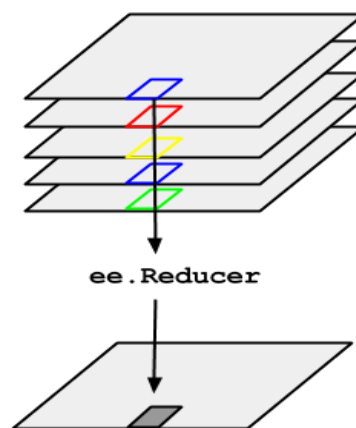
Para tanto, houve a separação dos postos por grupo (*cluster*) e calculou-se a média do IAC dos postos dentro do mesmo grupo para cada ano de avaliação, durante o período 1987 a 2019. A partir daí, foi feita a classificação da intensidade.

3.5 Dados de satélites

Nesse estudo, houve a avaliação de toda a região do estado de Pernambuco, na qual foram determinados os parâmetros NDVI, EVI, SAVI, NDWI, albedo da superfície e temperatura da superfície no período de 2000 a 2019, a partir da coleção de produtos MODIS, como apresentado por Ribeiro (2016) e Silva (2016). O processamento das imagens foi desenvolvido na plataforma do *Google Earth Engine*, ambiente que contém diferentes coleções de imagens de satélites e alta capacidade de processamento.

Ressalta-se que o sensor MODIS possui produtos desde 2000 até o período atual e esse estudo avaliou a variação anual dos parâmetros biofísicos. Para tanto, foi realizado um recorte na área de estudo e determinou-se uma imagem representativa dos parâmetros biofísicos em nível anual. Essas imagens foram geradas através de uma redução (Figura 2), que pode ser feita por meio de diferentes critérios, mas no presente estudo foi aplicada a função de média (.mean) e máximo (.max).

Figura 2 – Funcionamento da redução da coleção de imagens em uma única imagem.



Fonte: *Google Earth Engine*

Quando a função média foi aplicada, obteve-se uma imagem com valor médio de cada pixel para o período de avaliação (anual), enquanto a função máxima permitiu usar o maior valor de cada pixel. O uso do valor da média permitiu compreender o comportamento geral

da superfície durante o período de avaliação, enquanto, a redução do máximo do pixel visa à obtenção de uma resposta máxima da superfície terrestre. Com isso, o intuito foi identificar qual critério de redução minimizaria a interferência de nuvens na superfície.

Para cada parâmetro biofísico, em cada ano de avaliação (2000-2019), e com cada tipo de redução de imagem (média e máxima), foi obtida uma estatística descritiva da imagem. Ressalta-se que para esse aspecto, o *Google Earth Engine* apresenta uma desvantagem, pois não permite identificar as estatísticas das imagens diretamente. Para resolver essa limitação, criou-se uma redução da imagem de interesse para uma imagem de um único pixel, de tamanho semelhante ao do produto MODIS (500 ou 1000 m), que teve seu valor associado à estatística de toda a área de interesse. A avaliação anual permitiu compreender as mudanças em escala regional dos parâmetros biofísicos.

Para a geração dos parâmetros biofísicos foi necessário criar as funções para cálculo de novas bandas NDVI, EVI, SAVI, NDWI, Albedo à superfície e Temperatura, conforme metodologia abaixo. Os produtos MODIS escolhidos para execução dessa etapa foram: Temperatura/Emissividade da Superfície Diária L3G Global 1km (MOD11A1), que possui 12 camadas com 1 km de resolução espectral, sendo utilizada a temperatura da superfície (K), o horário local e as emissividades das bandas 31 e 32; e o produto Reflectância da Superfície Diária L2G Global 1 km e 500m (MOD09A1) para obtenção dos índices de vegetação, Índice de Água e Albedo com 500 m de resolução espacial.

Os produtos MOD11A1 e MOD09A1 são uma composição de 8 dias. Esses produtos foram corrigidos, por meio de fatores de correção – multiplicador e adicional – referente à cada camada (Tabela 2), de forma gerar uma imagem com valores reais.

Tabela 2 – Fatores e resolução das imagens dos produtos MODIS

Discriminação da Camada	Fatores		Resoluções	
	Multiplicador	Adicional	Temporal	Espacial
MOD11A1				
Temperatura da superfície (k)	0,02	-	Diária	1 km
Horário local (hora)	0,1	-	Diária	1 km
Emissividade de cada pixel banda 31 (-)	0,002	0,490	Diária	1 km
Emissividade de cada pixel banda 32 (-)	0,002	0,490	Diária	1 km
MOD09A1				
Reflectância das Bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7	0,0001	-	Diária	500 m

Fonte: NASA (2020). Disponível em: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/>

Dessa forma, foram geradas 20 imagens para cada parâmetro, totalizando 60 imagens para o período de 2000 a 2009, para o critério de redução média, e mais 60 para redução máxima, resultando em 120 imagens.

3.6. Parâmetros Biofísicos com Produtos MODIS

Para a modelagem dos parâmetros biofísicos foram obtidos: a estimativa do albedo da superfície, os índices de vegetação (NDVI, EVI e SAVI), o Índice de Água (NDWI) e a temperatura da superfície, conforme Apêndice B.

A obtenção do albedo da superfície (α), que corresponde à razão entre a radiação solar global refletida e o incidente atuantes em cada pixel ao longo do espectro eletromagnético, se deu pela Equação 4, sugerida por Tasumi, Allen e Trezza (2008):

$$\alpha = 0,251p1 + 0,215p2 + 0,242p3 + 0,129p4 + 0,101p5 + 0,062p6 - 0,036p7$$

eq.4

As reflectâncias monocromáticas relativas a cada uma das sete bandas espectrais do MODIS (MOD09GA) são representadas por p1, p2, p3, p4, p5, p6 e p7.

Os índices de vegetação utilizados no presente estudo estão demonstrados no Quadro 4 abaixo. Ressalta-se que o índice NDVI foi obtido diretamente a partir do produto MOD09GA com base nas reflectâncias nas faixas do infravermelho próximo e vermelho do sensor MODIS.

Quadro 5 – Índices de vegetação obtidos por sensoriamento remoto

Índice	Sigla	Equação	Autor
Índice de Vegetação da Diferença Normalizada	NDVI	$NDVI = \frac{rbIV - rbV}{rbIV + rbV}$ Eq. 5	ALLEN et al. (2002)
Índice de Vegetação ajustado ao solo	EVI	$EVI = G \times \left(\frac{RbIV - RbV}{RbIV + C1 \times RbV - C2 \times RbA + LI} \right)$ Eq. 6	Huete et al. (1997)
Índice de Vegetação ajustado ao solo	SAVI	$SAVI = \frac{(1 + L2) * (rbIV - rbV)}{(L + rbIV + rbV)}$ Eq. 7	ALLEN et al. (2002)

Fonte: autoria própria

Em que,

NDVI = Índice de Vegetação da Diferença normalizada;

RbIV = Reflectância da banda do Infravermelho próximo – Banda 2;

RbV = Reflectância da banda do Vermelho – Banda 1;

EVI = Índice de Vegetação ajustado ao solo;

L1 = Fator de ajuste do solo, valor de 1;

RbA = Reflectância da banda do Azul – Banda 3;

G = Um índice que corresponde a 2,5;

C1 = Corresponde à 6;

C2 = Corresponde à 7,5;

SAVI = Índice de Vegetação ajustado ao solo;

L2 = Corresponde à 0,1 - constante de ajuste ao solo;

O Índice de Diferença Normalizado da Água ou *Normalized Difference Water Index* (NDWI), proposto por Gao (1996), é um índice que busca detectar a água na vegetação e solo, com isso pode ser considerado com um índice independente da vegetação. Esse parâmetro auxilia no entendimento da dinâmica da vegetação e na identificação das possíveis modificações de cobertura do solo, destacando também as condições dos corpos hídricos.

Esse índice é obtido pela razão da reflectância do Infravermelho próximo e Infravermelho médio, conforme a equação 8.

$$NDWI = \left(\frac{RbIV - RbIVM}{RbIV + RbIVM} \right) \quad \text{eq.8}$$

Em que,

NDWI = Índice de Água da diferença normalizada;

RbIV = Reflectância da banda do Infravermelho próximo – Banda 2;

RbIVM = Reflectância da banda do Infravermelho médio – Banda 7;

A temperatura da superfície foi obtida com o produto MOD11A1, com aplicação de um fator multiplicativo de 0,02 nessas imagens, transformando desse modo, a informação de temperatura em Kelvin. Após isso, a imagem foi transformada em graus Celsius (°C).

3.7 Análise dos Parâmetros Biofísicos

Em cada imagem gerada, nos respectivos parâmetros biofísicos, procedeu-se uma análise da estatística da imagem – média e desvio-padrão- e mapas temáticos dos parâmetros biofísicos. Em seguida as análises de tendência temporal e sazonalidade em anos de precipitação extrema auxiliaram a compreender melhor as mudanças ocorridas.

Além disso, os valores médios mensais de cada posto de precipitação foram extraídos com o intuito de compreender o comportamento dos grupos homogêneos de precipitação anual. Com a base dos valores mensais de cada posto, se obteve uma média dos valores para cada grupo, em seguida, o valor médio anual dos parâmetros biofísicos. Com esses resultados, as análises de tendência temporal e sazonalidade em anos extremos também foram aplicadas para detectar as possíveis mudanças e diferenças dos grupos de precipitação.

3.7.1 Análise de Tendência Temporal dos Parâmetros

Para averiguar a ocorrência ou não das mudanças da dinâmica ambiental, verificou-se a existência de tendências, seja aumento ou redução, dos parâmetros biofísicos no estado de Pernambuco ao longo dos anos observados. Para tanto, um teste não-paramétrico de tendência temporal de Mann-Kendal (MANN, 1945; KENDALL, 1975) foi aplicado, considerando estatisticamente significância ao nível de 5%. Essa etapa foi desenvolvida em ambiente R, com o uso do pacote `modifiedmk`.

O teste de Mann-Kendall é robusto, sequencial e não paramétrico, o que permite verificar se há tendência temporal de alteração da variável. Esse teste não requer que os dados apresentem uma distribuição normal e sofre pouca influência de mudanças repentinas ou séries não homogêneas, contudo ele requer que os dados sejam independentes e homogêneos (OLIVEIRA et al., 2018; SALVIANO; GROppo; PELLEGRINO, 2016).

A determinação da independência das variáveis da série temporal foi realizada por meio do teste da função de autocorrelação, observado no correlograma. Quando a variável não apresentou autocorrelação, o teste foi feito conforme metodologia apresentada por Sneyers (1975). Para as variáveis que apresentaram autocorrelação, o teste utilizado foi o Mann-Kendall modificado proposto por Hamed e Rao (1998).

O teste baseia na hipótese nula (H_0) de que não existe tendência na série de dados e a hipótese alternativa de que existe uma tendência temporal da variável, a $\alpha\%$ de significância – nesse estudo adotamos 5%. Para complementar a análise, o coeficiente τ de Kendall indica

se a tendência foi crescimento (>0) ou decréscimo (<0), enquanto a declividade de Theil-Sen β mensura a magnitude da tendência (CAMPOS; MARINHO; CHAVES, 2020).

3.7.2 Análise da Sazonalidade dos Parâmetros Biofísicos nos Anos de Precipitação Extrema

Outra análise desenvolvida foi a sazonalidade mensal dos parâmetros biofísicos nos anos com precipitação extremas – seca e úmida. Para tanto, os anos foram escolhidos com base no IAC dos grupos homogêneos. Após isso, realizou-se uma composição mensal dos parâmetros biofísicos com base no critério de redução com menor efeito das nuvens.

Além disso, obteve-se a média de precipitação para cada mês nos anos do intervalo a partir da média dos postos pluviométricos. Os dados de precipitação foram utilizados para comparar com os resultados da média de cada parâmetro biofísico ao longo dos meses, bem como para a análise de correlação, a fim de verificar o grau de concordância de cada parâmetro biofísico com a precipitação. Devido ao fato de os parâmetros estarem em escalas diferentes, aplicou-se uma transformação dos dados do tipo normalização Min-Max para deixar todas as variáveis na mesma ordem de grandeza (0 a 1) e, em seguida, a correlação dos parâmetros seguiu o procedimento semelhante ao descrito no tópico 3.3.

Essa mesma análise foi desenvolvida com os valores dos parâmetros biofísicos nos postos, para os quais foram obtidos uma média mensal para cada zona homogênea de precipitação. Testes de correlação de Pearson foram desenvolvidos para identificar quais zonas mais afetam a dinâmica no estado de Pernambuco e quais parâmetros possuem maior associação com a precipitação nos anos avaliados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados iniciais apresentam as zonas homogêneas ou grupos de precipitação anual, seguidos de uma análise dos regimes de precipitação referente aos anos de 1987 até 2019. Após essa etapa, seguem-se os dados dos parâmetros biofísicos, tanto no regime anual do período de 2000 a 2019, quanto na sazonalidade dos parâmetros em anos de precipitação extremas – secos e úmidos. Ao final, foi possível observar uma região considerada crítica no estado de Pernambuco, para a qual se desenvolveu uma análise detalhada dos fatores atuantes nesse comportamento.

4.1 Precipitação em Pernambuco

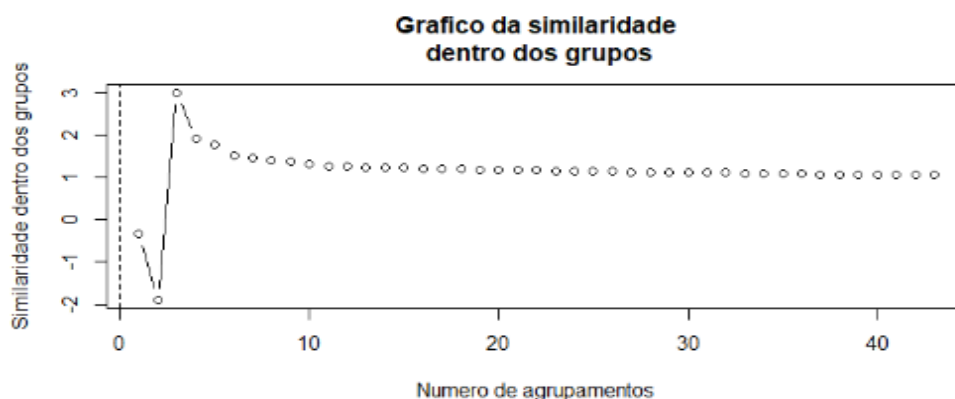
Na análise da precipitação, inicialmente, houve a separação dos grupos ou zonas homogêneas de precipitação com uso da técnica hierárquica. Em seguida, procedeu-se à análise do regime de precipitação dos grupos baseada no IAC em nível anual para cada grupo.

4.1.1 Análise hierárquica

Aplicando a técnica hierárquica, com o critério de partição proposto por Ward (1963), a separação em dois grupos possui a menor similaridade dentro dos grupos (Figura 3). Enquanto a separação em quatro ou mais grupos não modifica a similaridade dentro dos grupos. Portanto, os resultados permitiram observar que a melhor quantidade de grupos para essa análise foram três grupos (Figura 3).

Em outros estudos realizados nos estados de Pernambuco (de SOUZA COSTA et al., 2017) e da Paraíba (MACEDO et al., 2010), a quantidade ideal de três grupos também foi encontrada. Contudo é importante destacar que, no presente estudo, o regime analisado foi o anual, enquanto os estudos citados analisaram a precipitação mensal.

Figura 3 – Gráfico de distância dos grupos ou zonas homogêneas de precipitação anual.

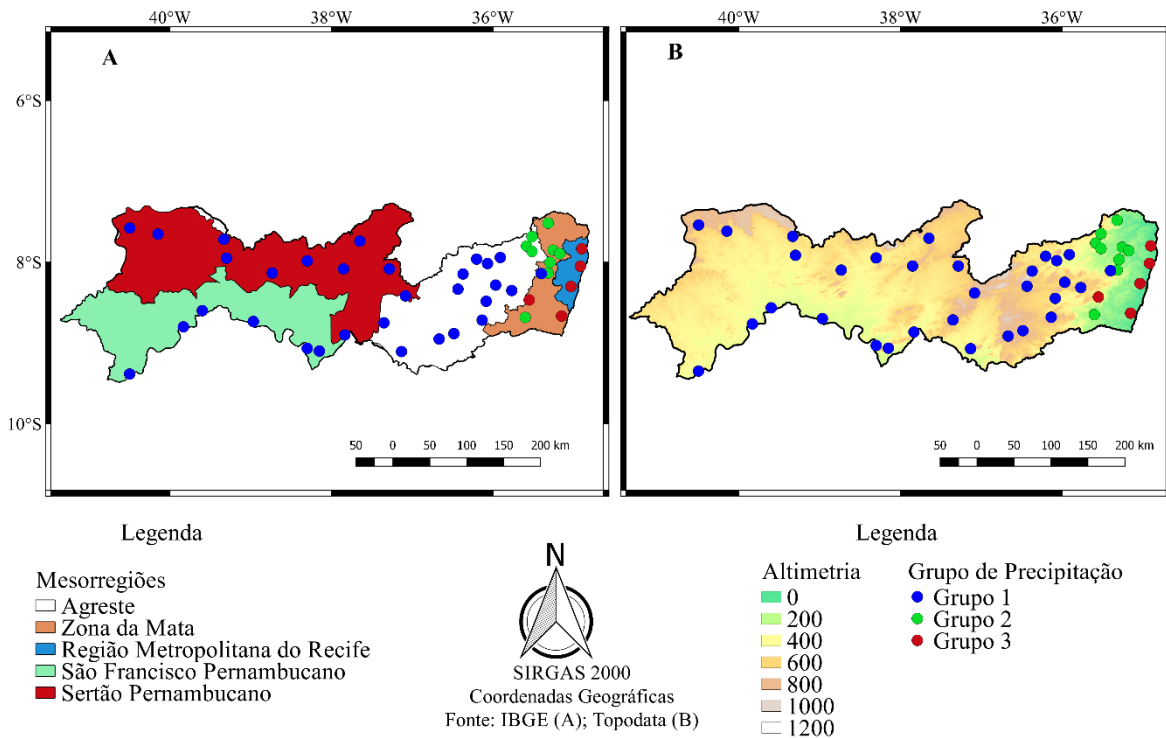


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Dentre os grupos obtidos na classificação por Ward, o Grupo 1 se localiza no interior do estado, na mesorregião do Sertão do São Francisco Pernambucano e no Agreste, região semiárida de Pernambuco, o qual possui maior abrangência no estado de Pernambuco (Figura 4A). O Grupo 2 se encontra em uma faixa de transição entre a mesorregião do Agreste e a Zona Da Mata (Figura 4A) e o Grupo 3 se localiza, principalmente, no litoral, nas mesorregiões da Região Metropolitana do Recife e Zona da Mata (Figura 4A). Destaca-se que o grupo de transição possui uma concentração maior ao norte do estado de referência, mas com algumas regiões na parte sul.

Além disso, em termos de altimetria, percebe-se que o Grupo 1 se localiza na região de maior altitude, acima de 300 metros (Figura 4B). Enquanto os Grupos 2 e 3 estão localizados em uma região com altitude menor, próximo do litoral do estado (4B).

Figura 4 - Mapas dos grupos com a precipitação anual obtidos com o método hierárquico (Ward) para o estado de Pernambuco: (A) Mesorregiões; (B) Altimetria.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Ao analisar os valores das estatísticas dos grupos, nota-se as diferenças entre os grupos formados (Tabela 3). Destaca-se o Grupo 1, da região do semiárido, com valor médio de precipitação abaixo do limite de classificação atual da SUDENE (BRASIL, 2017), que corresponde a 800 mm anuais. Enquanto a região do Grupo 2 possui um valor acima da precipitação média do semiárido. Por sua vez, o Grupo 3 apresenta valores altos de precipitação, os resultados desse grupo corroboram os valores de Costa et al. (2017).

Tabela 3 - Estatística descritiva da precipitação anual nos grupos formado pelo método de Ward.

Grupos	Média	Desvio Padrão	CV(%)	Mediana	Máximo	Mínimo
1	562,94	147,36	26%	545,37	850,56	245,43
2	1029,61	253,13	25%	1015,51	1537,70	469,21
3	1830,28	403,84	22%	1834,13	2944,94	1060,22

Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A precipitação pluvial é um fenômeno ligado aos processos de convecção local. Molion e Bernardo (2000) classificam os Mecanismos de Grande Escala (Sistemas Frontais

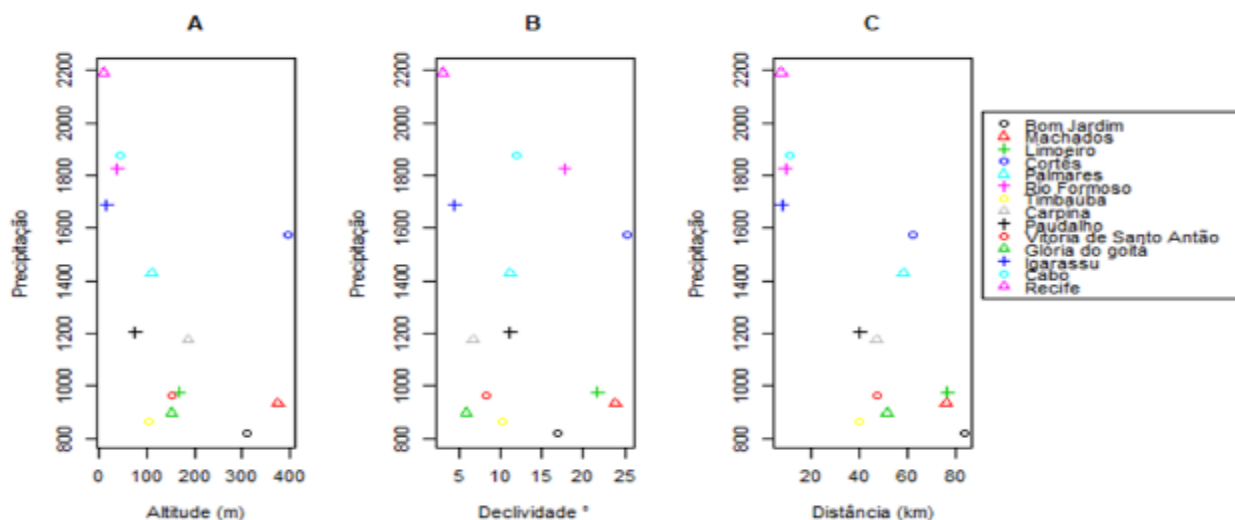
e Zona de Convergência Intertropical, ZCIT); de Meso Escala (Perturbações Ondulatórias no Campo dos Ventos Alísios; Complexos Convectivos e Brisas Marítima e Terrestre); e Micro escala (Circulações Orográficas e Pequenas Células Convectivas).

Ao observar a formação dos grupos, destaca-se que o Grupo 1 corresponde à região do semiárido, apresentando irregularidade intranual da distribuição pluviométrica. Os fatores que afetam a precipitação da região são a posição geográfica, o relevo, as características da superfície e o sistema de tempo atuantes. O período chuvoso na parte oeste da região ocorre entre os meses de janeiro a maio e, na parte leste, de abril a agosto (MARENGO et al., 2011). O principal fator causador das precipitações na região é a zona de convergência intertropical (ZCIT), afetada pelas variações das temperaturas da superfície do mar (TSM) nos oceanos tropicais (pacífico e atlântico), como bem Silva et al. (2010).

Por outro lado, os Grupos 2 e 3 (Figura 4A) ocupam uma região fisiográfica próxima, nas Mesorregiões da Região Metropolitana do Recife, Zona da Mata do Estado de Pernambuco e Agreste, apresentando um clima quente e úmido, com o período chuvoso variando de abril a julho (CUNHA et al., 2015) e similaridade com relação ao padrão altimétrica (4B). Os mesmos mecanismos de grande escala atuam nessa região, com isso, os fatores de meso e microescala, em especial os efeitos orográficos – relacionado à formação do relevo, tais como: altitude, declividade, orientação de vertentes e distância do litoral – devem atuar para gerar, nessa separação, grupos de precipitação anual.

Uma vez que a formação do grupo do semiárido já é bem conhecida, buscou-se compreender os mecanismos atuantes na formação dos Grupos 2 e 3 (Figura 4A e 4B). Para tanto, procedeu-se à análise da correlação da precipitação média anual com a altitude, a declividade e a distância do mar – principais características fisiográficas que influenciam a precipitação na região, conforme estudos de Pereira (2013) e Cândido e Nunes (2008). Dessa forma, a Figura 5 apresenta a precipitação média de cada posto, classificada nos Grupos 2 e 3, em relação às respectivas características.

Figura 5 – Relação das Características fisiográficas da precipitação com: (A) Altitude (m); (B) Declividade (°) e (C) Distância do Mar (km).



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Entre os grupos em questão, os postos apresentaram, no litoral, uma altitude mínima de 11 m, ao passo que a máxima foi de 397 m, na parte mais continental, e uma média de 152,643 m. Enquanto a declividade apresentou um valor mínimo de 2,95°, com valor máximo de 25,22 ° e média de 12,68°, a distância mínima para o mar foi 7,23 km, máxima distância de 85,85 km e uma média de 44,06 km.

A Tabela 4 demonstra que as características avaliadas possuem uma distribuição normal e apresentam correlação inversa à precipitação, sendo a distância a característica de maior correlação, seguida da altitude e da declividade, respectivamente. Contudo, ao realizar o teste de significância da correlação, a distância do mar foi a única variável com correlação significativa.

Tabela 4 – Teste de normalidade e coeficiente de correlação de Pearson

Variável	Distribuição Normal Tipo	Correlação r
Altimetria (m)	Normal	-0.513 ^{ns}
Declividade (°)	Normal	-0.217 ^{ns}
Distância - Mar (km)	Normal	-0.779**

Códigos de Significância: ** Ao nível de 1%; * Ao nível de 5%; ^{ns} Não significativo

Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Pereira (2013) encontrou resultados semelhantes ao analisar as condições no litoral norte de Alagoas, apesar de não considerarem a declividade. Contudo, os resultados indicaram que esta última característica – Declividade -, não afeta de maneira significativa na precipitação. O Dados da Pesquisa (2020) destaca que a região mais próxima do litoral possui taxas maiores de precipitação por causa da influência dos ventos alísios que fornecem umidade ao continente e à medida que há um afastamento do oceano a taxa de precipitação tende a diminuir por haver uma diminuição da umidade do ar.

Portanto, na região de zona da mata no estado de Pernambuco, forma-se dois grupos de precipitação devido à distância do oceano, a brisa marítima, no qual as áreas mais próximas ao oceano apresentam maiores níveis de precipitação e as áreas mais afastadas possuem menores níveis.

4.1.2 Índice de Anomalia de Chuva

Para a realização dessa etapa, foi feita uma avaliação tendo como referência a classificação de Ward (Tabela 1). Verificou-se a existência de alguns períodos de seca nos grupos, com maior recorrência no Grupo 1, referente ao grupo do semiárido. Percebeu-se, nesse grupo, um período de estiagem para os anos de 1990 a 1995, sendo apenas o ano de 1992 considerado como ano úmido. Em seguida, um período recente de estiagem para o período de 2012 a 2017, variando de Seco a Muito Seco.

Os Grupos 2 e 3, por sua vez, apresentaram resultados muito próximos na classificação do regime de precipitação para os anos estudados, com alguns anos pontuais com classificações diferentes. Além disso, para o período de 2012 até 2016, esses grupos também apresentaram, em geral, classificação variando entre Seco e Muito Seco. Contudo, seus efeitos não foram fortemente sentidos devido ao fato de apresentarem altos valores acumulados de precipitação ao ano (Tabela 5).

Tabela 5 - Classificação dos anos com base no IAC para os anos 1987-2019.

-	Extremamente Úmido	Muito Úmido	Úmido	Seco	Muito Seco	Extremamente Seco
Grupo 1	-	1988 1989 2000 2004 2009	1992 -1994 1996 -1997 2002 -2005 2008 -2010 2011-2018 2019	1987 -1990 1991 -1995 1999 -2001 2003 -2006 2007 -2013 2014 -2016 2017	1993 1998 2012 2015	-
Grupo 2	2011	1994 2000 2004	1988-1989 1992 -1996 2002 -2005 2007 -2008 2009 -2010 2013 - 2019	1987 - 1990 1991 - 1995 1997 - 2001 2003 - 2014 2015 - 2016 2017 - 2018	1999 2006 2012	1993 -1998
Grupo 3	2000	1989 1994 2004 2011	1988 - 1990 1991 - 1992 1996 – 2002 2005 – 2007 2008 - 2009 2017	1987 – 1995 1997 - 2001 2003 – 2006 2010 – 2013 2014 – 2016 2018 - 2019	1999 2012 2015	1993 -1998

Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

As relações de anos secos e úmidos estão ligadas ao fenômeno *El Niño* (fases positivas do Pacífico) ou *La Niña*. Durante esse período, o fenômeno *El Niño*, na categoria forte, ocorreu nos anos de 1993, 1998 e 2012 (ALENCAR et al., 2007; SILVA, 2017). Enquanto que, em 1988, houve a influência do fenômeno *La Niña*, classificado como forte; em 2005, *La Niña* fraca e, em 2011, *La Niña* moderada (RODRIGUES et al., 2017).

Contudo, Andreoli et al., (2004) destacam que os eventos de *El Niño* ou *La Niña* não são capazes, sozinhos, de explicar os extremos negativos ou positivos de precipitação no Semiárido. A interação desses fenômenos com os sistemas meteorológicos e o Dipolo do Atlântico são determinantes no regime de chuvas do Nordeste do Brasil (ANDREOLI; KAIANO, 2007). Nesse sentido, nos anos de 2012-2013, houve seca coincidindo com dipolo positivo no Atlântico, que são anomalias negativas da temperatura da superfície do Oceano Atlântico. Esse fato ajudou a ocasionar o período de estiagem que afetou negativamente o Nordeste durante os anos de 2012 até 2017.

Com base nesses resultados (Tabela 5), não foi encontrado um ano em comum para os três grupos com classificação extremamente úmido ou extremamente seco. Dessa forma,

os anos extremos de precipitação, em comum aos três grupos, foram os anos de 2004, como muito úmido, e 2012, como muito seco. Por isso, esses anos foram utilizados como referência para avaliação da sazonalidade dos parâmetros biofísicos, permitindo compreender as diferenças ocasionada pelos regimes de precipitação.

4.2 Parâmetros Biofísicos

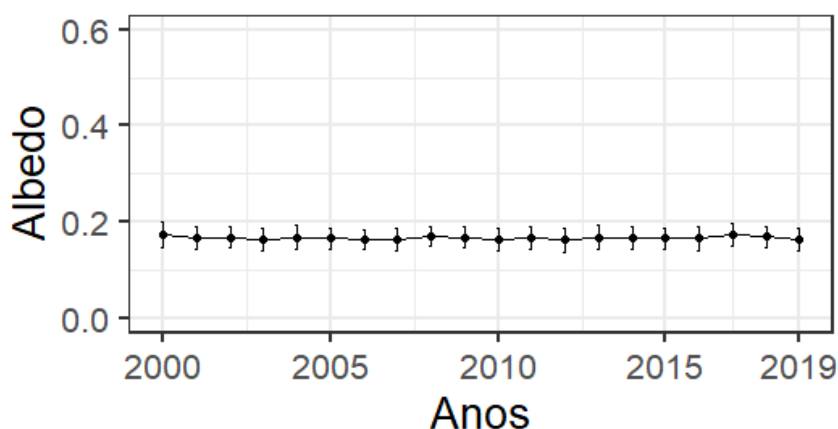
Nessa etapa, foram compreendidos os comportamentos dos parâmetros biofísicos de acordo com os dois critérios de redução anual da coleção das imagens, com a média e o máximo do pixel. Em seguida, aplicou-se a análise de tendência temporal dos parâmetros biofísicos, considerando todo o estado de Pernambuco e os grupos de precipitação anual, associada com a análise da sazonalidade dos parâmetros biofísicos nos anos de precipitação extrema.

4.2.1 Redutor média anual do Pixel

A análise dos parâmetros biofísicos possibilitou entender as mudanças ocorridas na superfície em suas diferentes formas de cobertura do solo. Cada região do estado apresenta suas próprias características climáticas geram formas diferentes da relação com as terras, contudo, buscou-se entender se as mudanças ocorridas de maneira global no estado de Pernambuco, assim como as modificações ocorridas ao longo desses 20 anos (2000-2019), ocasionaram mudanças significativas na resposta desses parâmetros.

Nesse sentido, a Figura 6 apresenta o comportamento do albedo com os respectivos valores médios e desvio padrão, no período de 2000 a 2019, com a média do pixel como critério de redução das imagens anuais. Foi observado que não houve variação na média do albedo durante esse período, com valor médio em 0,16 e o desvio-padrão de 0,02.

Figura 6 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do albedo da superfície com valor médio do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.



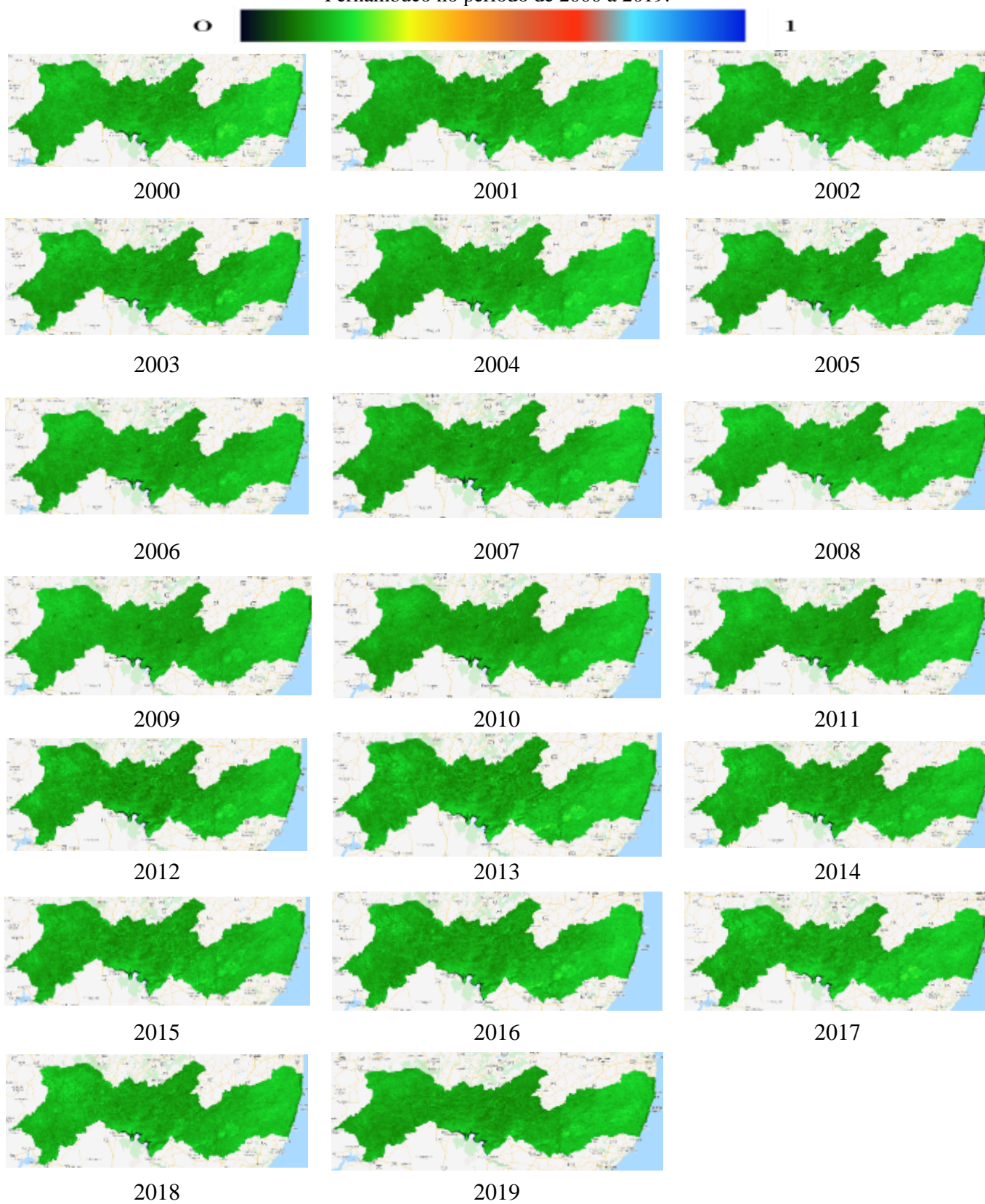
Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Nesse período, o ano de 2000 apresentou o maior albedo, com uma média de 0,17. Como o cálculo do albedo leva em consideração todas bandas espectrais do produto MOD09A1, é possível que o período de ajuste dos sensores tenha interferido nesse ano.

Ao observar a Figura 7, as imagens do albedo da superfície apresentaram o mesmo comportamento ao longo dos anos, com pouca variação no período de estudo. Mesmo no período de estiagem, não se observaram alterações no comportamento médio das imagens. Por outro lado, é possível perceber que a área da Zona da Mata e Litoral apresentam um tom de verde mais claro, indicando maiores valores do albedo. Essa área possui uma incidência maior de nuvens, o que eleva o valor do albedo e justifica os valores mais altos.

Outra área que apresenta valores maiores de albedo está localizada na região central e sul. Essa área se encontra entre os municípios de Belém de São Francisco, Floresta, Petrolândia, Tacaratu, Jatobá, Carnaubeira da Penha e Itacuruba com condição constante ao longo do tempo avaliado.

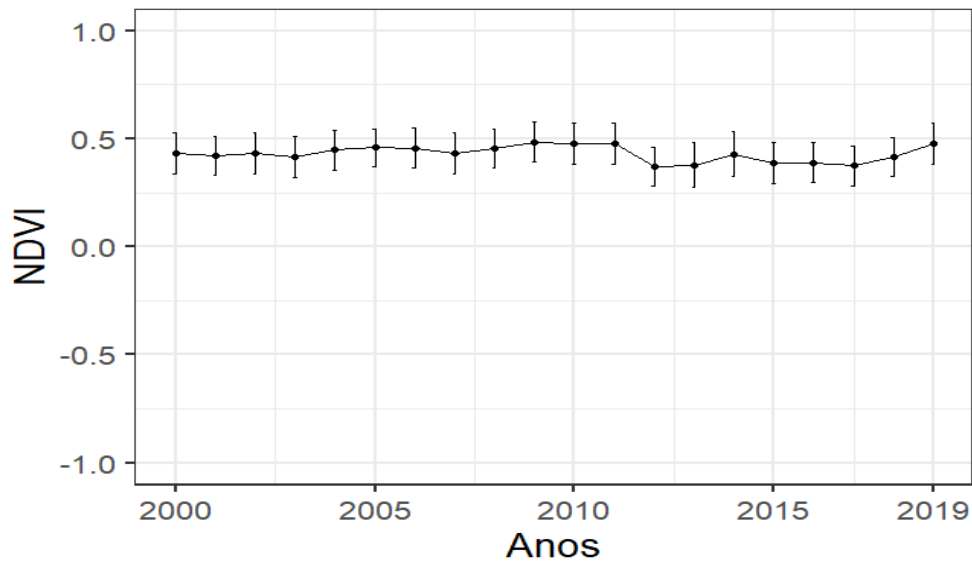
Figura 7 -Distribuição espaço-temporal do albedo da superfície com valor médio do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 8 apresenta os valores médios e desvio padrão do NDVI. Para o período de 2000 a 2008, os valores desse índice ficaram em torno de 0,44, enquanto no período de 2009 a 2011, o valor médio subiu para 0,48 e, de 2012 até 2017, a média baixou para valores próximos de 0,37. Ao longo do período de estudo, o desvio padrão se manteve próximo a 0,09.

Figura 8 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do NDVI com valor médio anual do pixel para 2000 – 2019.

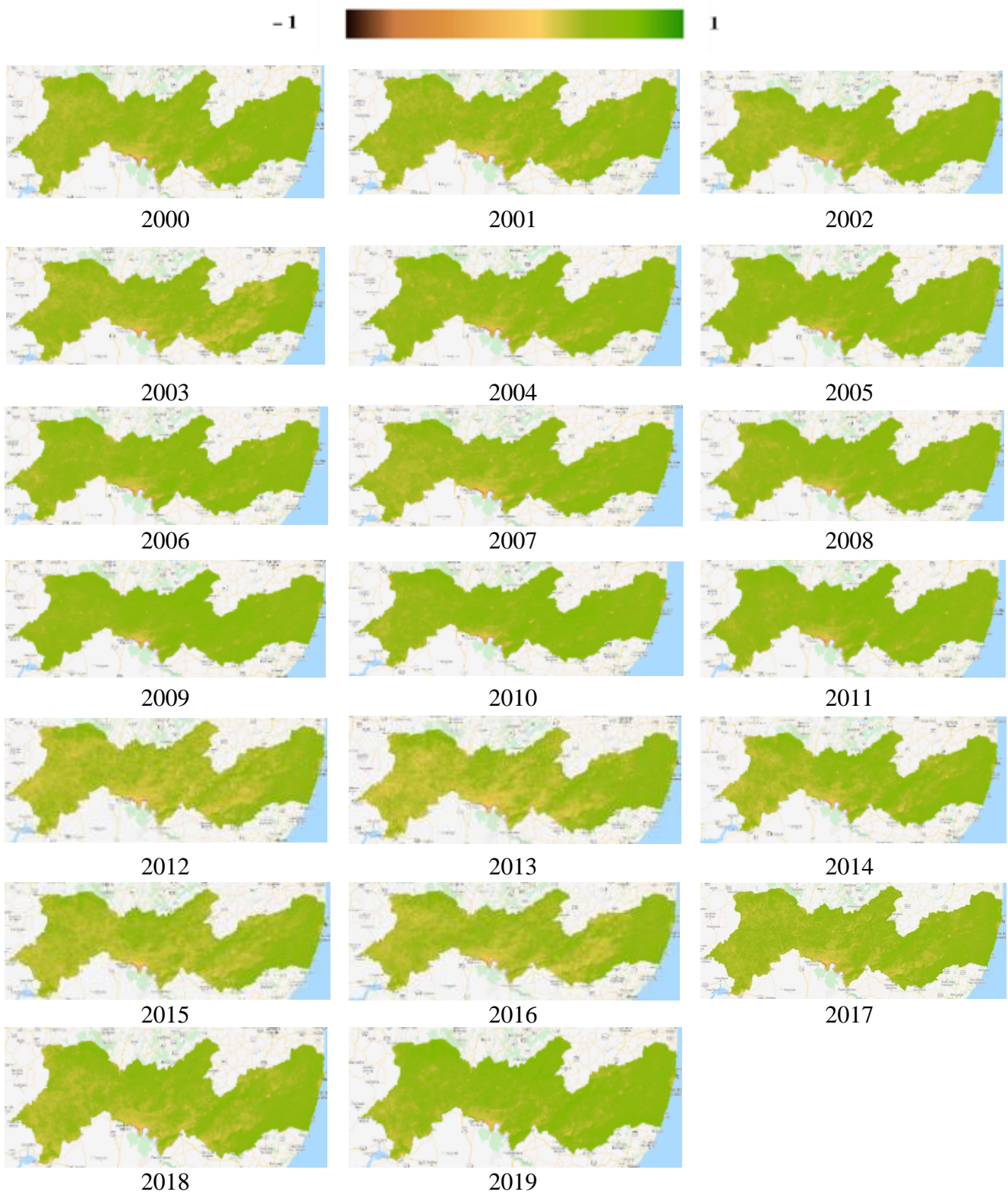


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Por sua vez, a Figura 9 apresenta os mapas de NDVI do valor médio anual de cada pixel para o estado de Pernambuco no período 2000 até 2019, para o qual há uma predominância de tons verdes nos mapas. Entre as regiões, podemos destacar que a Zona da mata e Litoral apresentam essa característica durante todos os anos avaliados, com exceção da Região Metropolitana do Recife, que apresenta tons mais claros de amarelo, por ser uma área com pouca vegetação. Enquanto as regiões do Sertão e Agreste apresentam uma dependência maior do regime de chuva.

Foi verificado que nos anos de estiagem, 2012 até 2017, houve um aumento das áreas com tons amarelos que indicam valores próximo à zero. É notável também, assim como no albedo, na área central e sul, uma condição crítica e constante. Ao longo dos anos avaliados, essa região sempre apresenta os menores valores de índice de vegetação, independente do regime de precipitação.

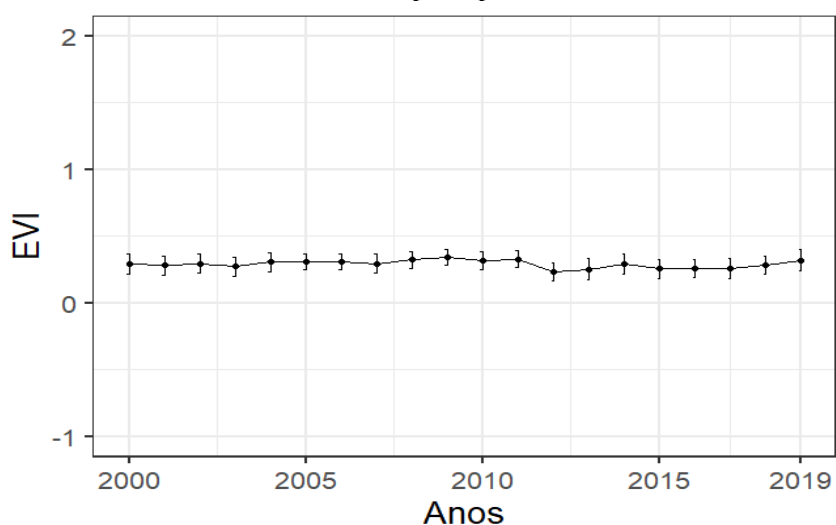
Figura 9 - Distribuição espaço-temporal do NDVI com o valor médio anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 10 apresenta os valores médios e o desvio padrão do EVI, usando o valor médio anual de cada pixel. Foi observado que, entre 2000 e 2008, os valores foram próximos a 0,29. Nos anos de 2009 até 2011, o valor médio aumentou para 0,31, devido ao período úmido de precipitação para todas as regiões do estado, enquanto de 2012 a 2017, a média reduziu para 0,25. Essa redução é devida, possivelmente, ao período de estiagem na região semiárida, que ocupa parte significativa do estado. Ao longo do período de estudo, o desvio padrão se manteve próximo a 0,07.

Figura 10 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do EVI com valor médio anual do pixel para 2000 – 2019.

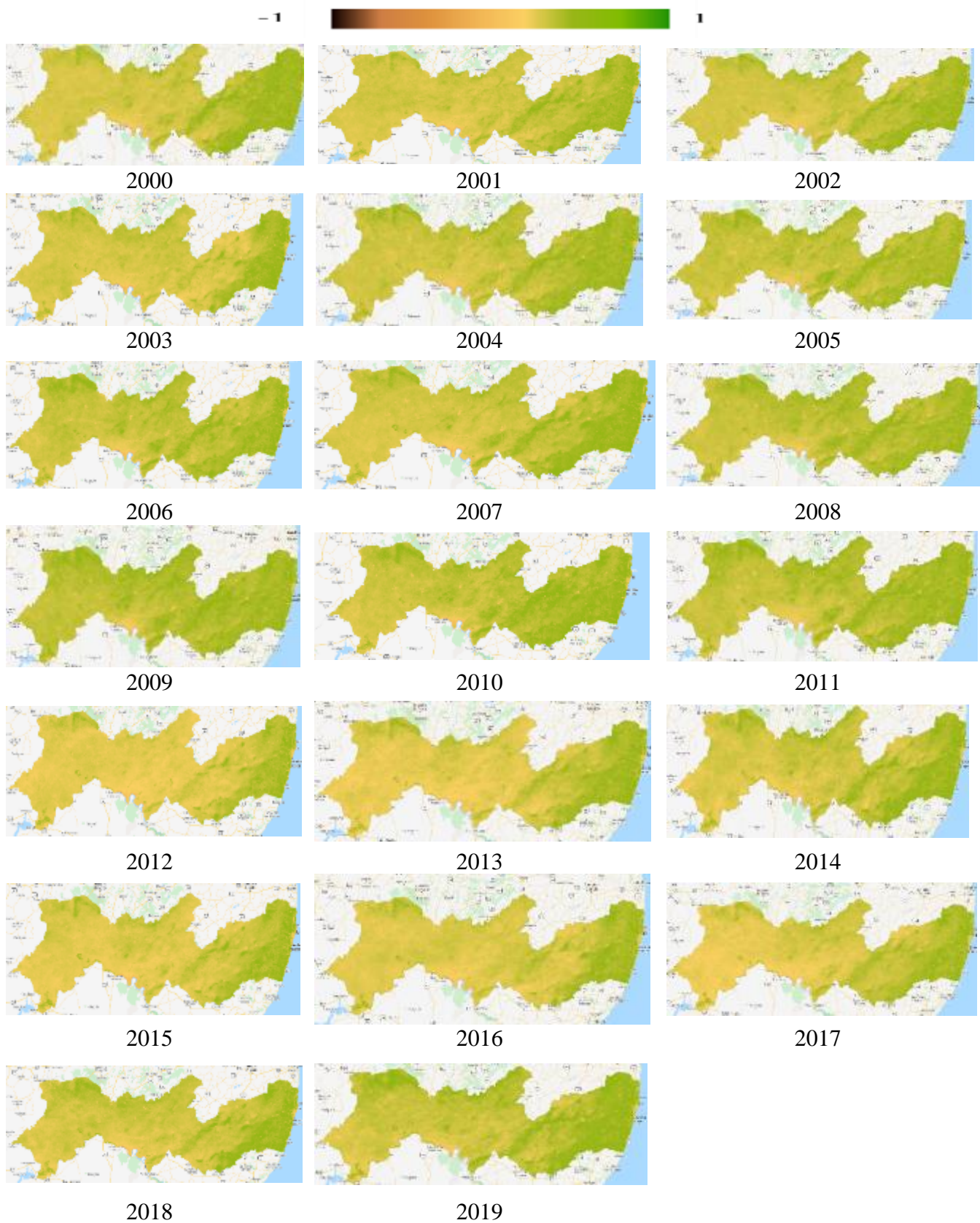


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 11 apresenta os mapas do EVI para estado de Pernambuco, de modo semelhante às imagens do NDVI. Verificou-se a predominância de tons verdes que indicam valores positivos para esse índice, representando uma boa resposta do vigor da planta. Contudo, é importante destacar que esse parâmetro apresenta valores inferiores ao parâmetro anterior, o que justifica os tons mais amarelos das imagens.

Observou-se maior resposta na região de Zona da Mata e Litoral, ocasionada pela maior quantidade de precipitação, durante o período de avaliação. Enquanto as regiões de Sertão e Agreste possuem uma configuração dependente do regime chuvoso do ano, na qual os anos mais chuvosos apresentaram uma resposta mais elevadas que os anos mais secos. Assim como nos outros parâmetros, a área central e sul apresenta uma condição crítica e constante no período de avaliação.

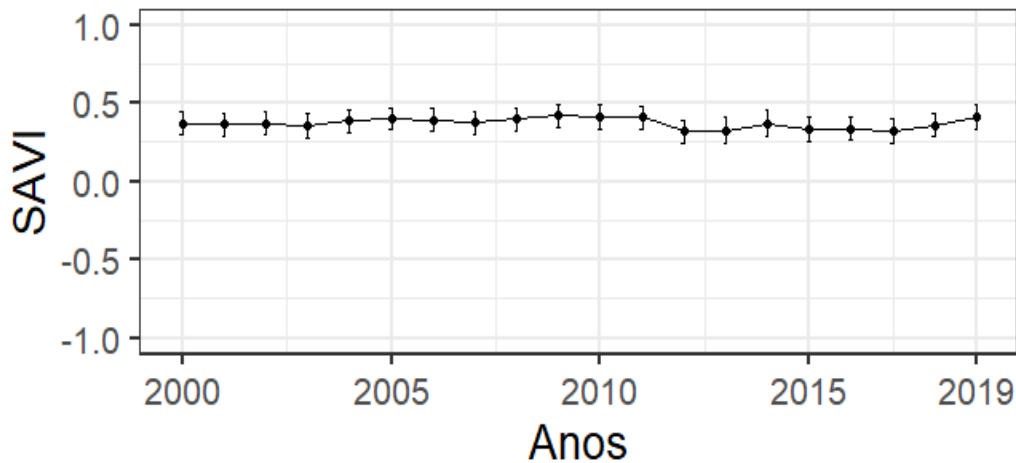
Figura 11 - Distribuição espaço-temporal do EVI com valor médio anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Na Figura 12, observam-se os valores médios e o desvio padrão do SAVI, que também apresenta um comportamento similar aos outros índices de vegetação. Para o período de 2000 até 2008, o valor médio foi em torno de 0,37, enquanto em 2009 até 2011, a média aumentou para 0,41. No período de estiagem, 2012 até 2017, o valor médio do estado de Pernambuco reduziu para 0,33. Ao longo do período de avaliação, o desvio padrão foi 0,07.

Figura 12 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do SAVI com valor médio do pixel para 2000 – 2019.

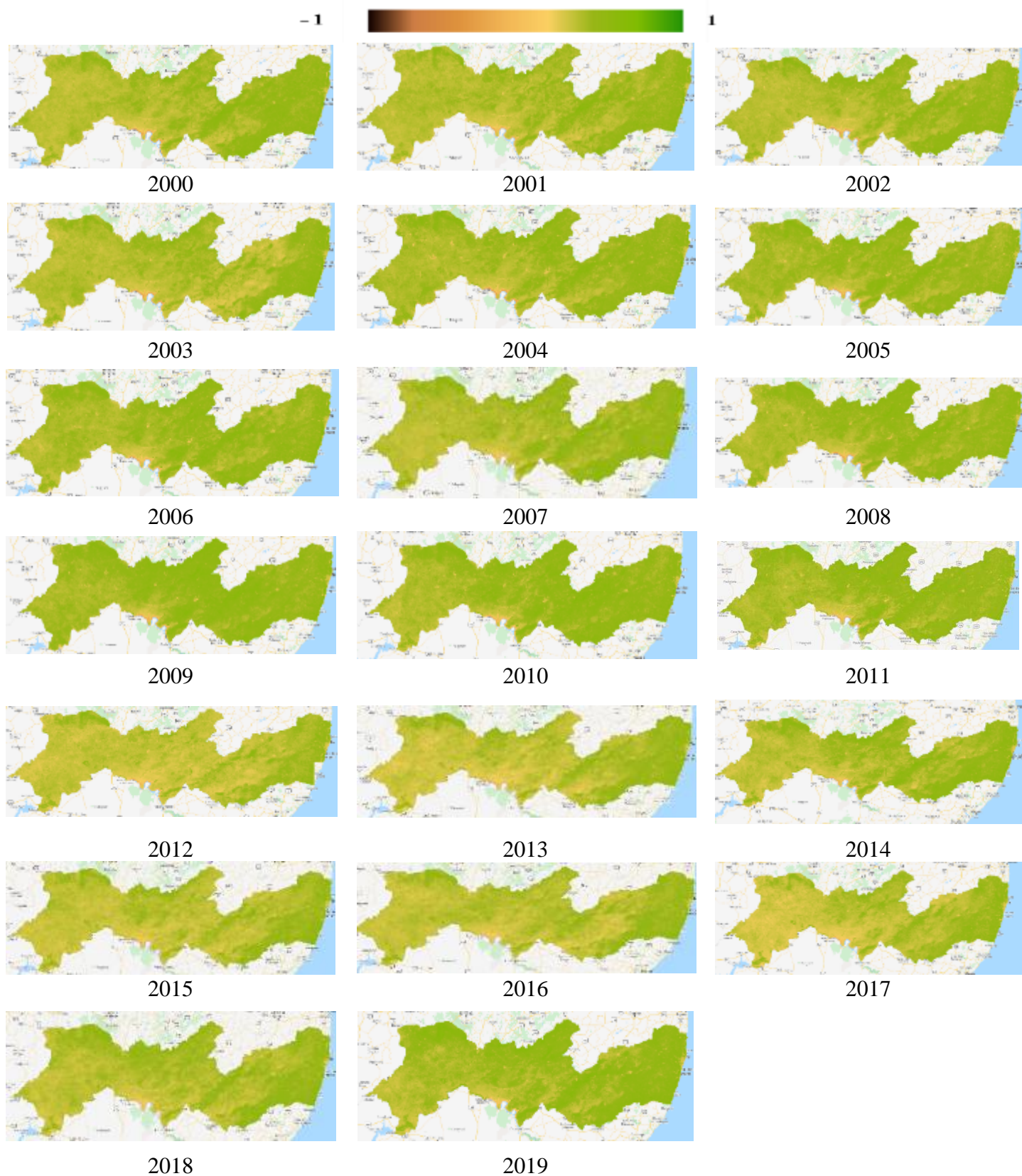


Fonte Dados da Pesquisa (2020)

O SAVI é um índice derivado do NDVI e que busca reduzir o efeito da resposta espectral do solo na obtenção da resposta da vegetação. Dessa forma, os valores também se apresentaram próximos ao NDVI e as imagens da distribuição do índice no estado, seguindo a mesma tendência, conforme a Figura 13.

Percebe-se o efeito da estiagem na região do semiárido nos anos de 2012 a 2017, com o aumento das áreas com tons amarelos, indicando valores menores do índice. Os efeitos da estiagem ainda foram percebidos na imagem de 2018 e de 2019, o qual expressou a recuperação da vegetação na maior parte do estado, representada com tons de verde, ou seja, valores mais próximos de 1 – o que indica maior densidade da vegetação na superfície. Além disso, verifica-se nesse índice uma região crítica e constante na parte central e sul do estado.

Figura 13 - Distribuição espaço-temporal do SAVI com valor médio anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.

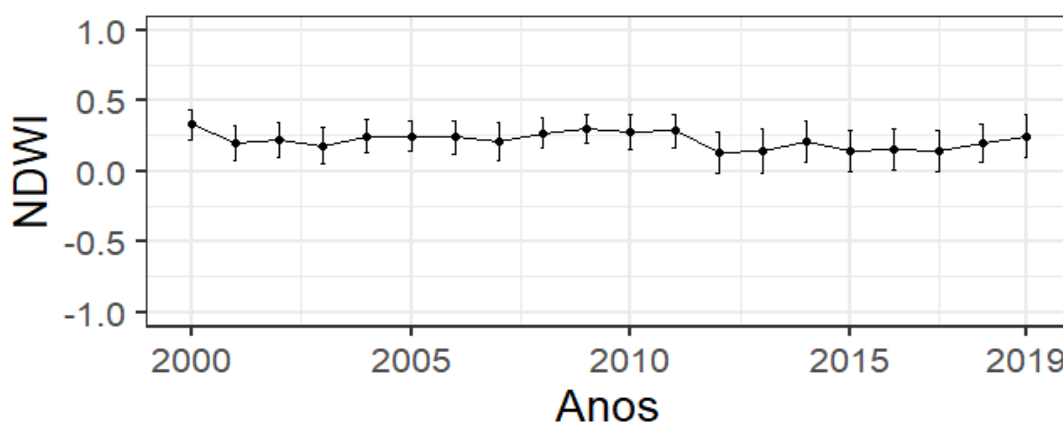


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 14 apresenta o comportamento da média e desvio padrão do NDWI para anos de avaliação, assim como os índices de vegetação, na qual se observou a relação com o regime de precipitação do ano. Os anos iniciais, 2000 até 2011, apresentaram um valor médio de 0,25, enquanto nos anos de 2012 a 2017, o valor médio caiu para aproximadamente 0,14 e, após esse período, voltou a aumentar nos anos de 2018 e 2019.

Contudo, o ano de 2000 apresentou o valor mais elevado, diferente dos índices de vegetação. Como em 1998 e 1999 o estado passou por um período de estiagem, isso torna inconsistente os resultados do NDWI para o ano 2000. Dessa forma, esses valores acima da média são, provavelmente, devido ao fato de o MODIS ter sido recém lançado e ainda estar ajustando os seus sensores. Assim, as bandas espectrais, em especial a Infravermelho média, apresentaram algumas incongruências que prejudicaram o cálculo do NDWI em 2000.

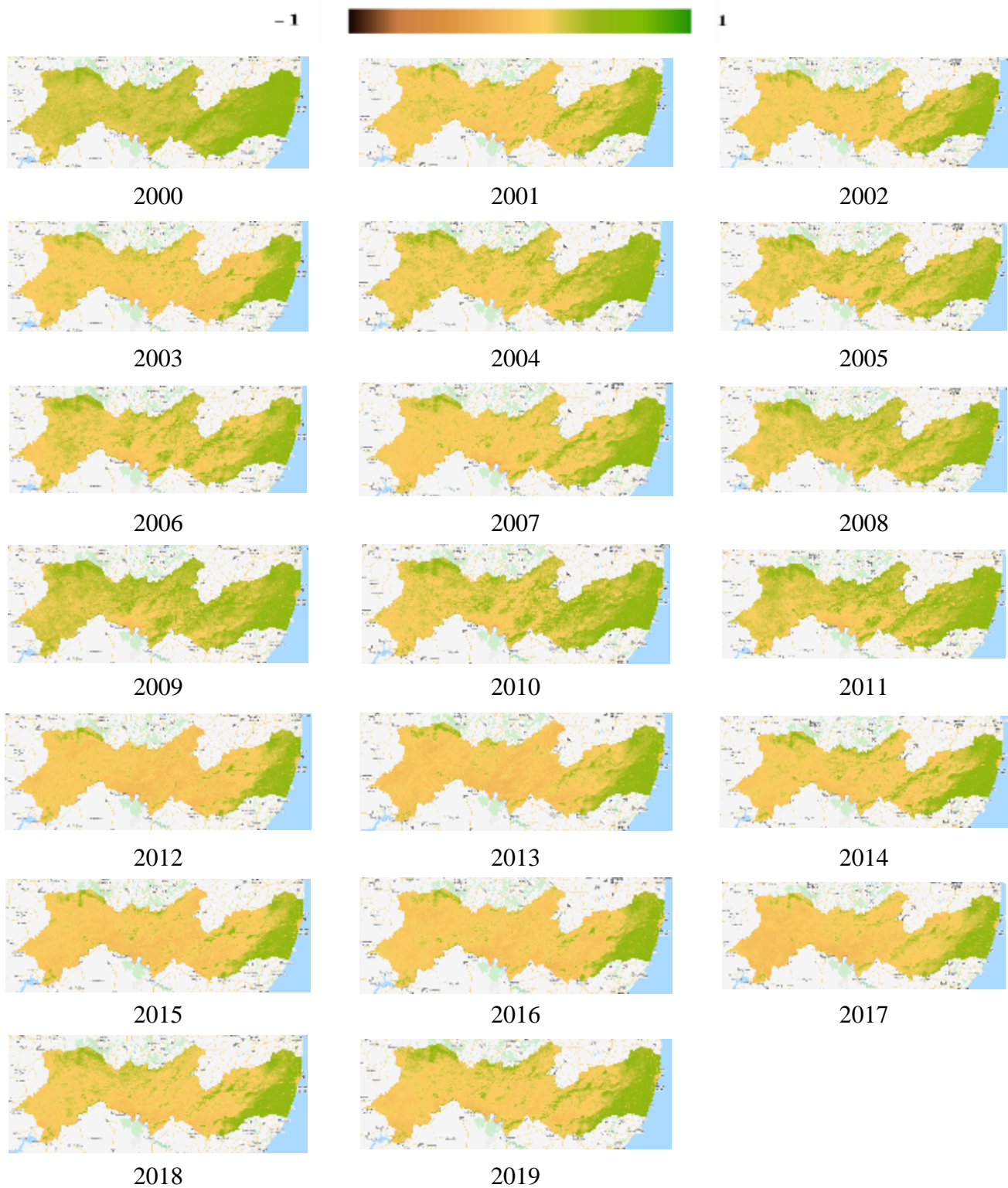
Figura 14 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do NDWI com valor médio do pixel para 2000 – 2019.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Na Figura 15, observam-se os mapas do comportamento do NDWI para o estado de Pernambuco, com maiores valores na região da Zona da Mata e do Litoral e menores valores na região sul do Sertão do São Francisco Pernambucano. Além disso, identificou-se o efeito da estiagem de 2012 a 2016, com o aumento da área com tons claros, próximo a zero, indicando a diminuição da concentração de água dos elementos da superfície. Observa-se uma área com menores valores do índice ao longo dos anos, com destaque para os anos chuvosos, na região central e sul do estado.

Figura 15 - Distribuição espaço-temporal do NDWI com valor médio anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

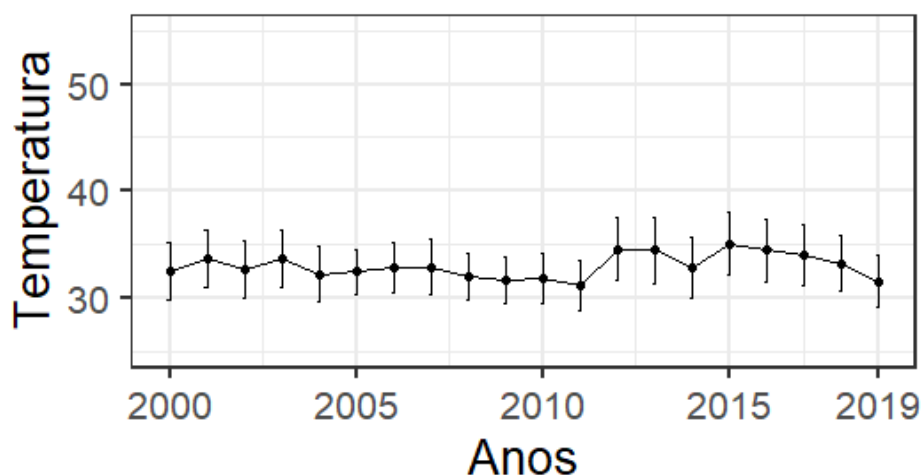
Vale destacar, para esse índice de vegetação (NDWI, Figura 15), principalmente comparado aos demais, que no ano de 2000, a região da Zona da Mata e Litoral, por exemplo, apresenta uma vegetação mais homogênea com alta formação do dossel foliar e biomassa vegetal. Dados os regimes de precipitação, esse ano apresentou-se extremamente úmido (Tabela 5).

Entretanto, pode-se destacar, também, que o último ano da análise espaço-temporal, 2019, aponta para uma cobertura vegetal com tonalidades mais claras, apresentando falhas na vegetação em alguns pixels, comportamento que por sua vez se repetiu em anos anteriores e, mais precisamente, nos anos de 2012 a 2018.

Na Figura 16, observam-se indicativos de comportamento oposto aos índices de vegetação e de água, quando, para os anos de menor chuva, houve aumento de temperatura e, para os anos de maior chuva, menor temperatura. No período de 2000 até 2008, a temperatura ficou em torno de 32,50 ° C; no período de 2009 até 2011, a temperatura foi de 31,80° C; no período de estiagem, a temperatura aumentou para 34,50°C; já em 2018 e 2019, houve uma redução de temperatura para 33,30°C e 31,55°C, respectivamente.

Esse comportamento se deve ao fato de que menores precipitações fazem com que o solo fique mais exposto, devido à redução da cobertura vegetal na superfície. Dessa forma, o solo que apresenta uma condutividade térmica maior fica mais exposto à radiação e aquece mais rápido. Com isso, há um aumento da temperatura da superfície.

Figura 16 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão da temperatura da superfície(°C) com valor médio anual do pixel.



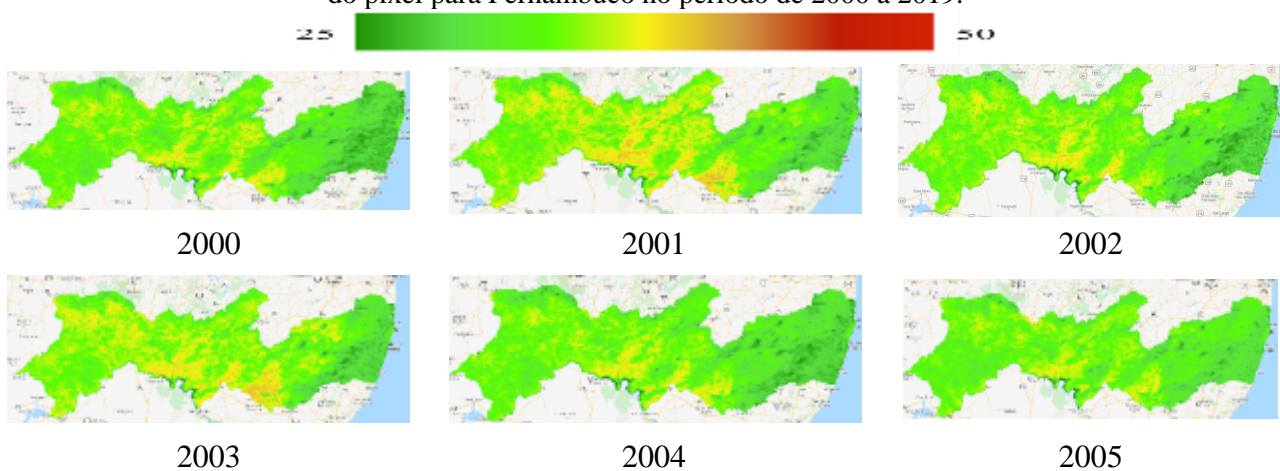
Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

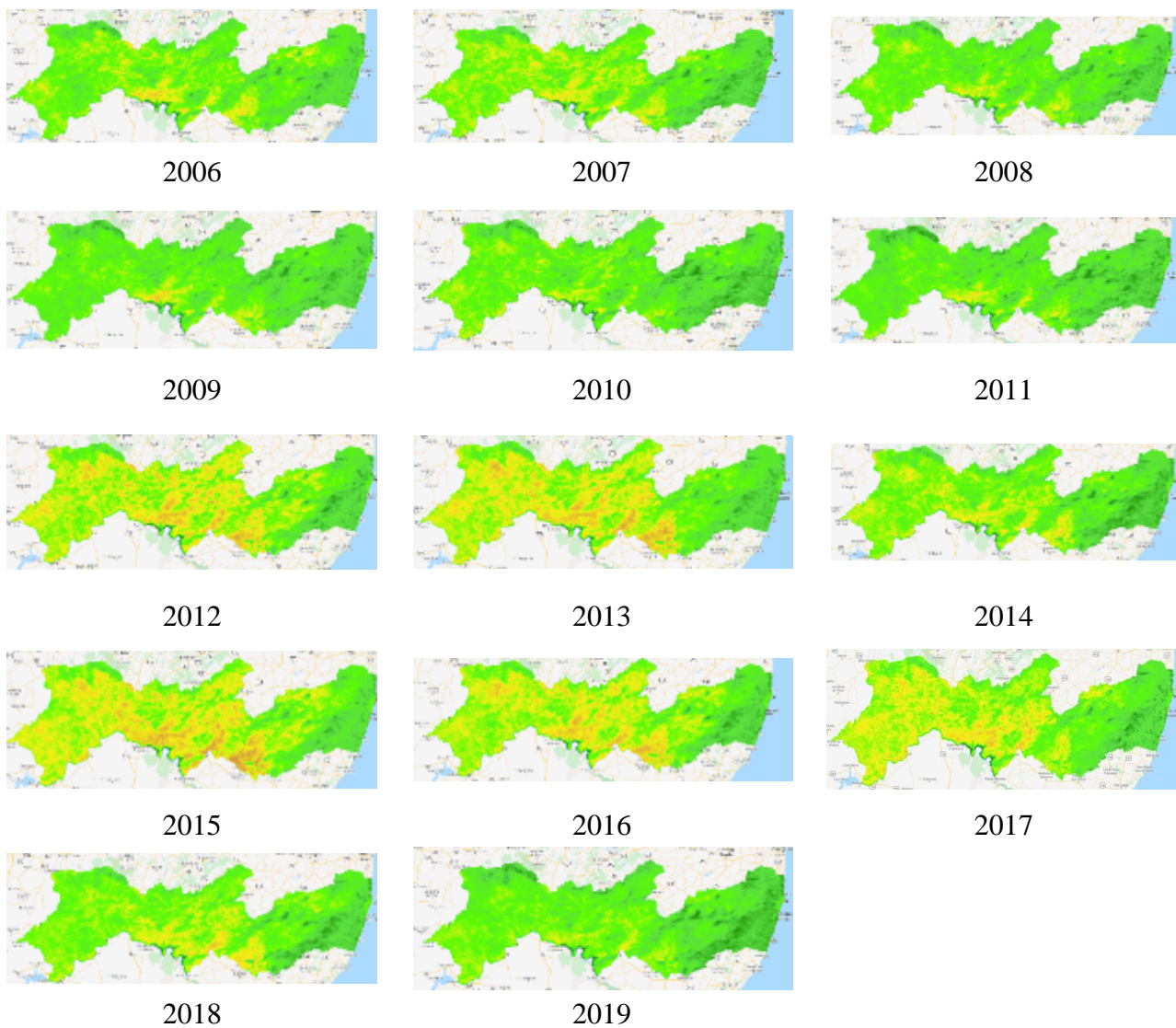
Por sua vez, a Figura 17 apresenta os mapas de temperatura no estado de Pernambuco durante o período de 2000 a 2019. É possível perceber que a região do sertão apresenta temperaturas mais altas quando comparadas à região litorânea e Zona Da Mata. Além disso, notou-se que a região sul do sertão apresenta as temperaturas mais elevadas em relação à área do semiárido. Isso, provavelmente, ocorre devido à maior exposição das superfícies dessas áreas. Por fim, observou-se o efeito da estiagem de 2012-2017 na região semiárida, para no qual a região apresentou um aumento da área de coloração amarela e vermelha, indicando que as temperaturas em média estavam, durante o ano, acima de 37,50° C.

Os mapas temáticos de temperatura confirmam a seca severa no período de 2012 a 2017 (Figura 17). Os baixos níveis de precipitação para a maioria das regiões semiáridas e para o estado de Pernambuco fizeram com que a condição de déficit hídrico se acentuasse. Silva et al. (2020), pesquisando o risco de degradação e de desertificação em uma região semiárida no estado do Ceará, entre o período de 2008 e 2015, alertaram que os déficits de precipitação e os constantes períodos de seca severos (observados com frequência ao longo do tempo no semiárido juntamente com o gradativo aumento da temperatura da superfície) fizeram com que o risco de degradação ambiental aumentasse nesse período.

Ao analisar os mapas de temperatura da superfície, assim como os demais parâmetros biofísicos, percebeu-se uma região que apresenta valores mais elevados em todos os anos avaliados. Essa região ocupa a área central e sul do estado, com valores sempre acima dos 35 °C, independente do regime de precipitação da região.

Figura 17 - Distribuição espaço-temporal da temperatura da superfície (°C) com valor médio anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.



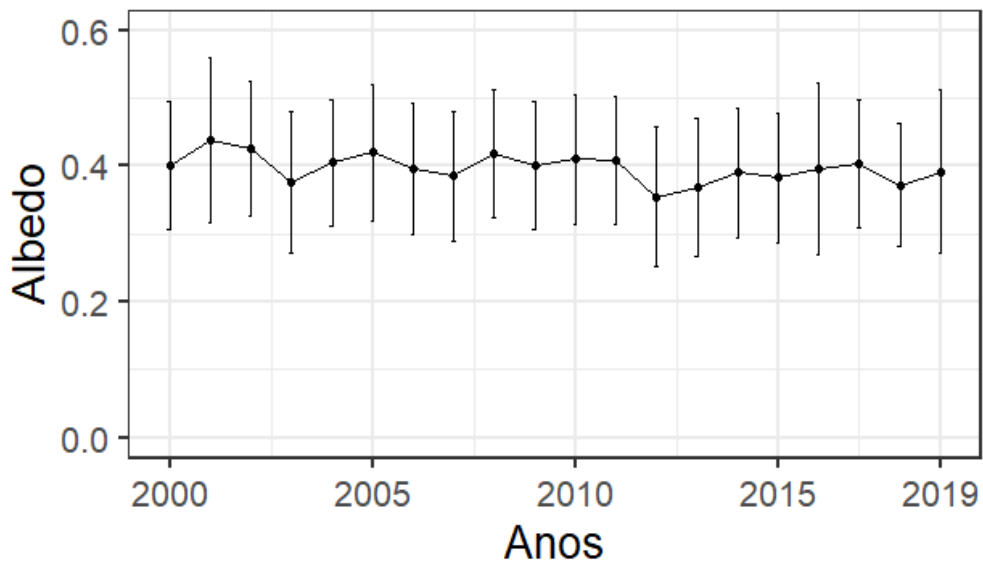


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

4.2.2 Redutor máxima anual do Pixel

Ao analisar os resultados da média dos valores máximos do pixel do Albedo (Figura 18), observou-se uma variabilidade maior entre os anos, porém sempre próximos de 0,40. Durante esse período, os anos de 2001 e 2008 apresentaram os maiores valores com albedo de 0,43, enquanto 2012 apresentou o menor valor, sendo esse de 0,36. O desvio padrão foi mais uniforme ao longo do período de estudo com o valor em torno de 0,10.

Figura 18 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do albedo da superfície com valor máximo do pixel.

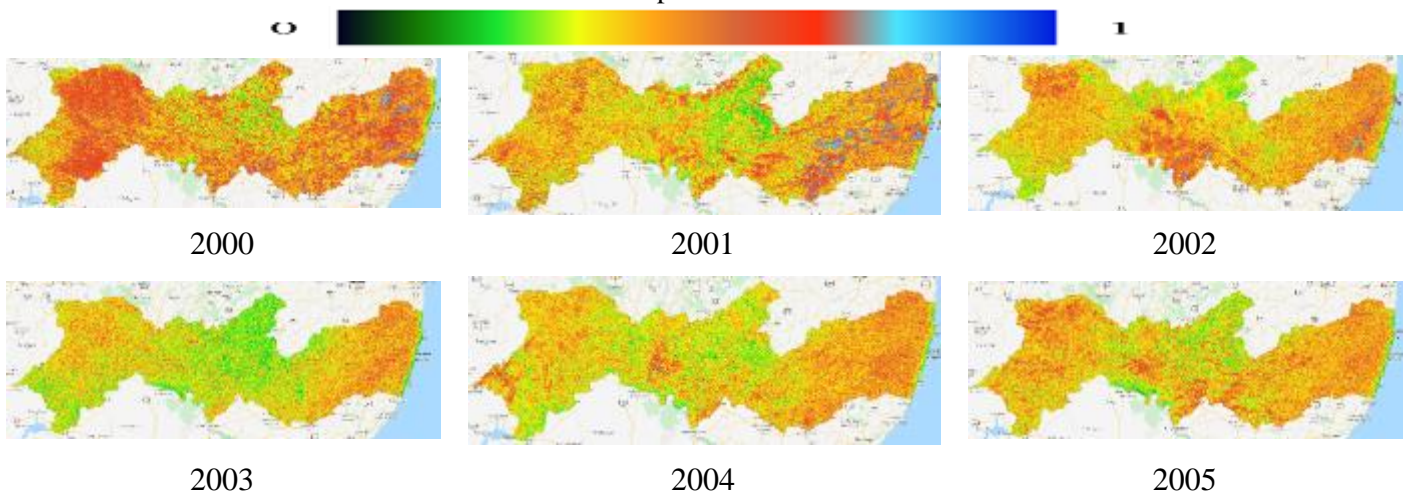


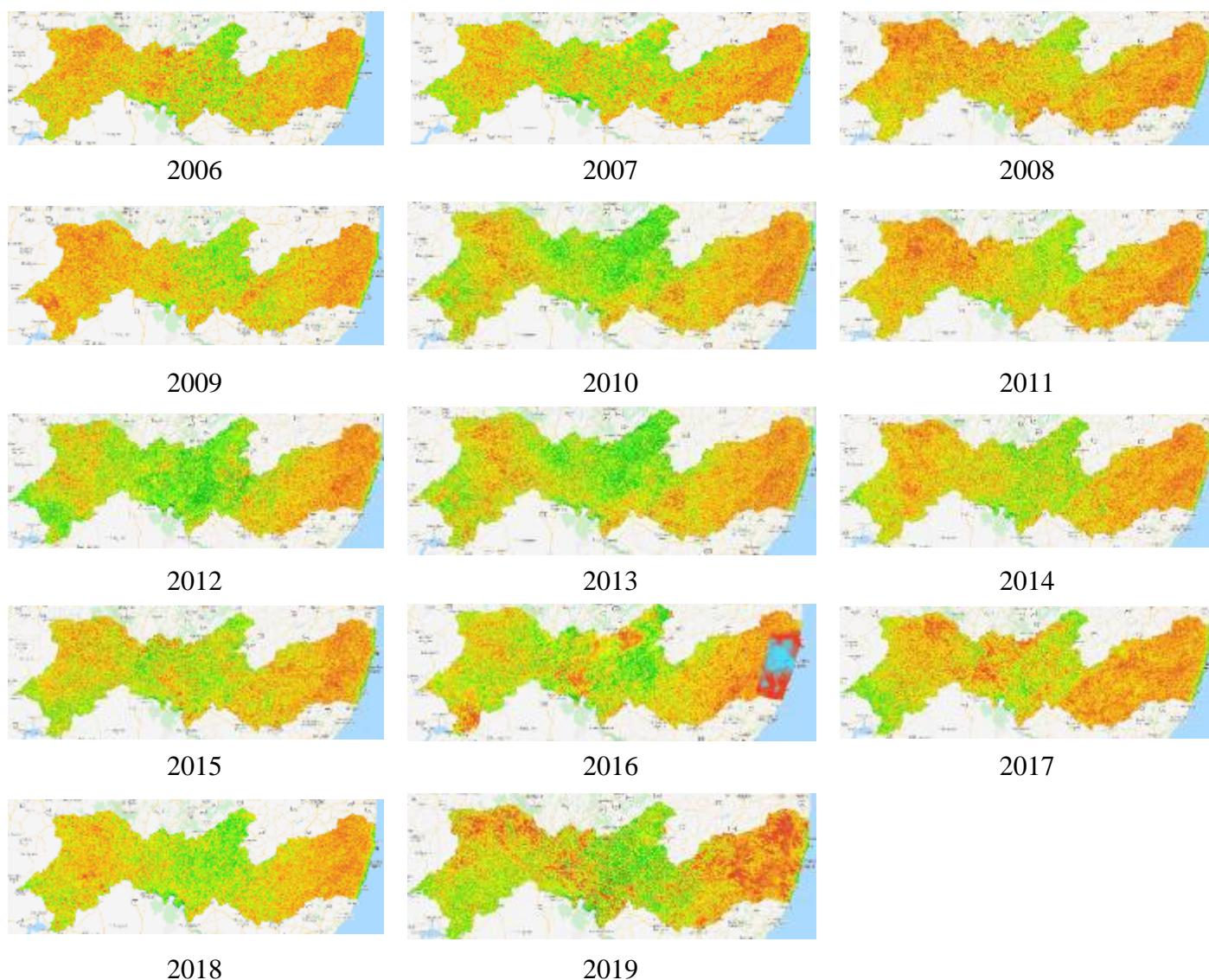
Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 19 apresenta os mapas de albedo ao longo dos anos no estado de Pernambuco. Nas imagens, observaram-se as diferenças entre as regiões. A área próxima ao litoral apresenta uma coloração mais avermelhada ao longo dos anos, indicando maiores valores de albedo na área. A área no sertão, por sua vez, apresenta uma maior variabilidade do albedo ao longo dos anos, mas com tendência de menores valores de albedo, com tons mais verdes.

Destacam-se que algumas imagens apresentam contaminações, tais como as imagens dos anos de 2000, 2001, 2002 e 2016, devido a problemas dos sensores e de nuvens nas regiões.

Figura 19 - Distribuição espaço-temporal do albedo da superfície com valor máximo do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.

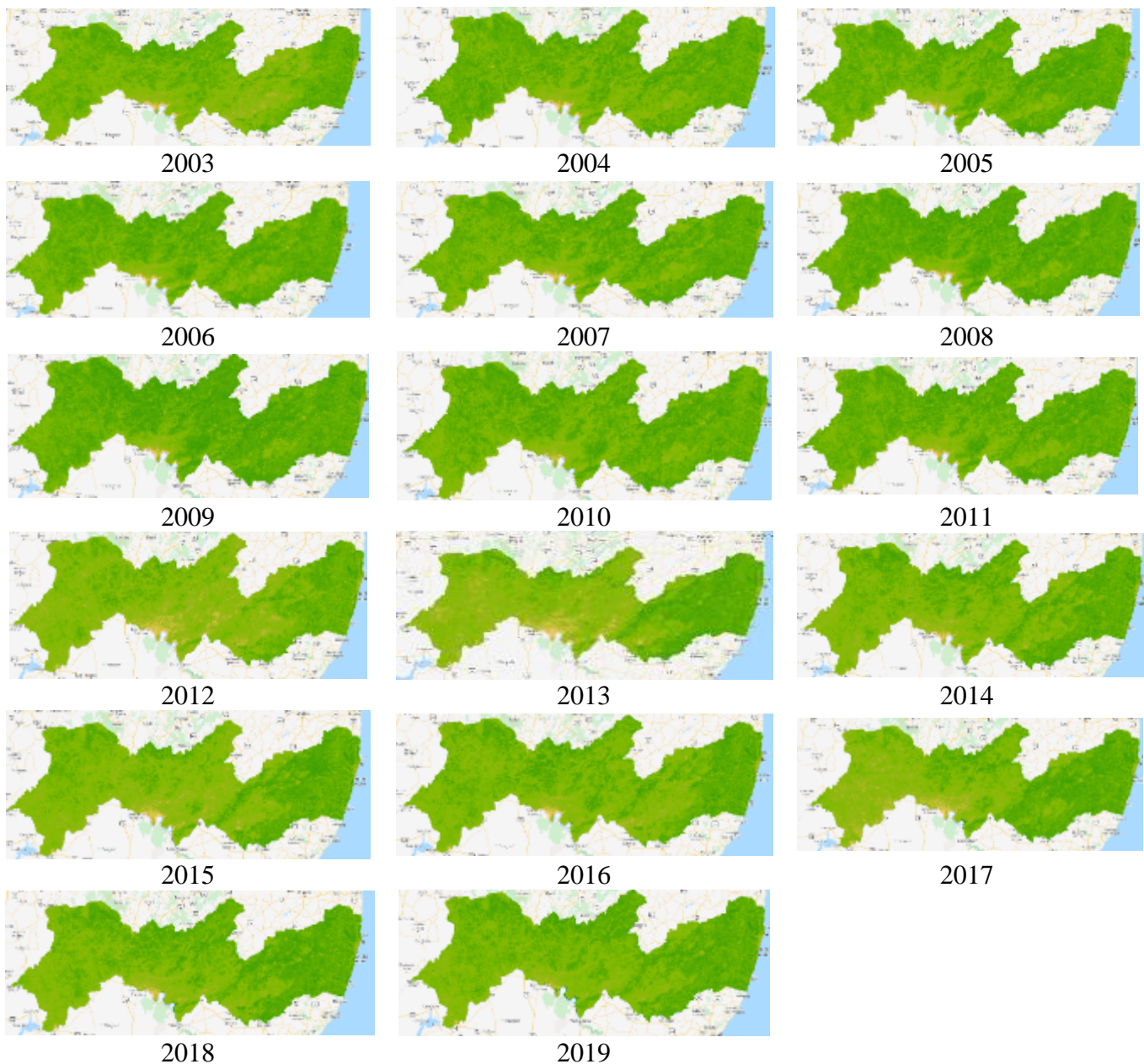




Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Na Figura 20, observa-se que o NDVI apresenta, para os anos iniciais até 2011, valores em torno de 0,76. Nesse período, a menor média foi para o ano de 2003, com um valor de 0,73, enquanto os anos de 2000 e 2009 corresponderam aos maiores valores, com NDVI de 0,80. Após esse período, assim como nos valores médio anuais, ocorre uma redução da média dos valores máximos, durante os anos de 2012 e 2013, expressando valores de 0,64 e 0,65, respectivamente. Nos anos de 2014 a 2019 a média dos valores máximos de NDVI aumenta para 0,72.

Durante esse período, o desvio padrão apresentou algumas diferenças. Nos anos iniciais até o ano de 2011, os valores ficaram em torno de 0,09. Contudo, a partir do ano de 2012, houve um aumento para 0,12, sendo 2013 o ano de maior variabilidade com 0,16. Esse aumento do desvio se deve ao fato de que, no período de estiagem, a vegetação não responde

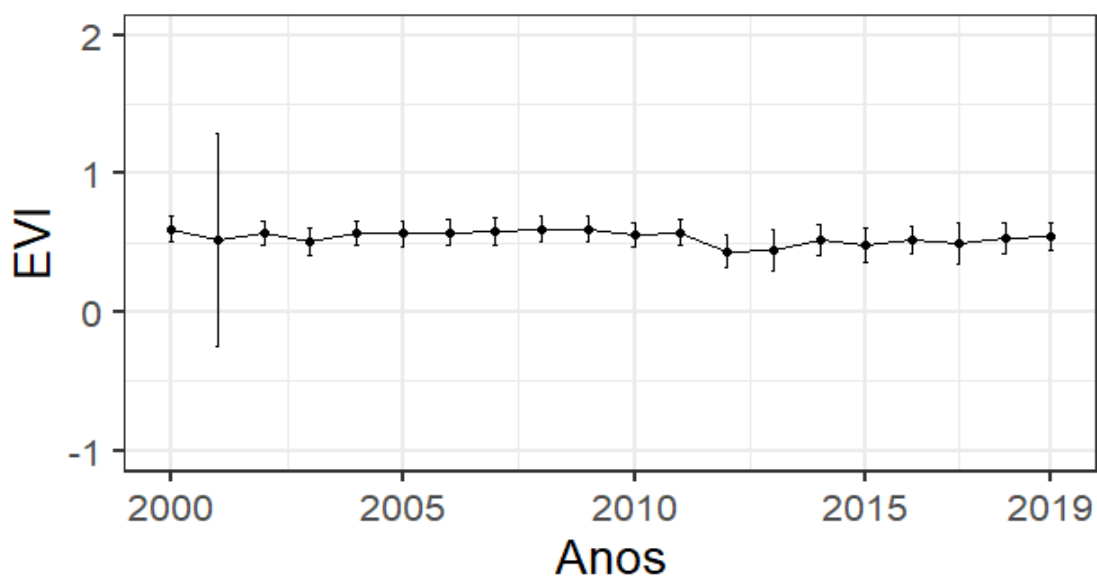


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Para o parâmetro do EVI máximo do pixel, a média no estado de Pernambuco ao longo dos anos tendeu à proximidade (Figura 22), com um valor de 0,56. O ano de 2009 apresentou a maior média para o estado, com um valor de 0,60, enquanto o ano de 2012 apresentou a menor média com 0,43.

Por sua vez, o desvio padrão apresentou valores próximos de 0,1, com exceção do ano de 2001, que obteve um valor de 0,76. Provavelmente, ao longo do ano de 2001, houve algum problema de contaminação das imagens que alterou a discrepância entre os pixels.

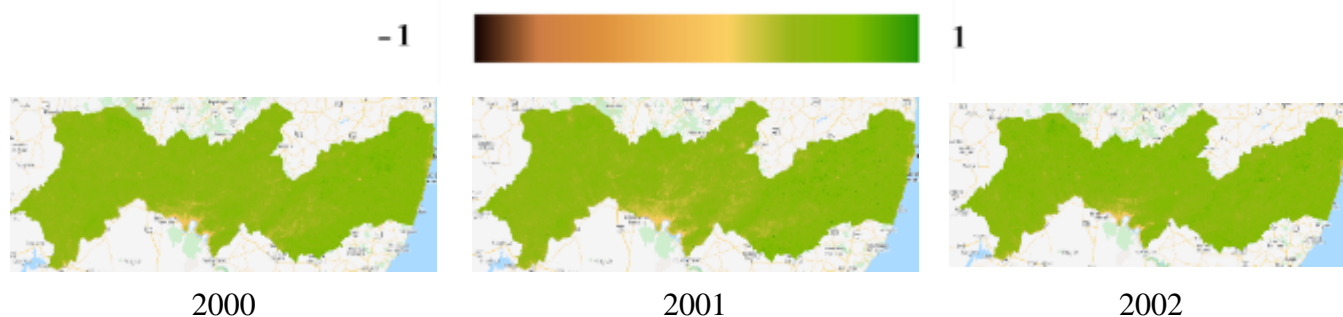
Figura 22 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do EVI com valor máximo do pixel.

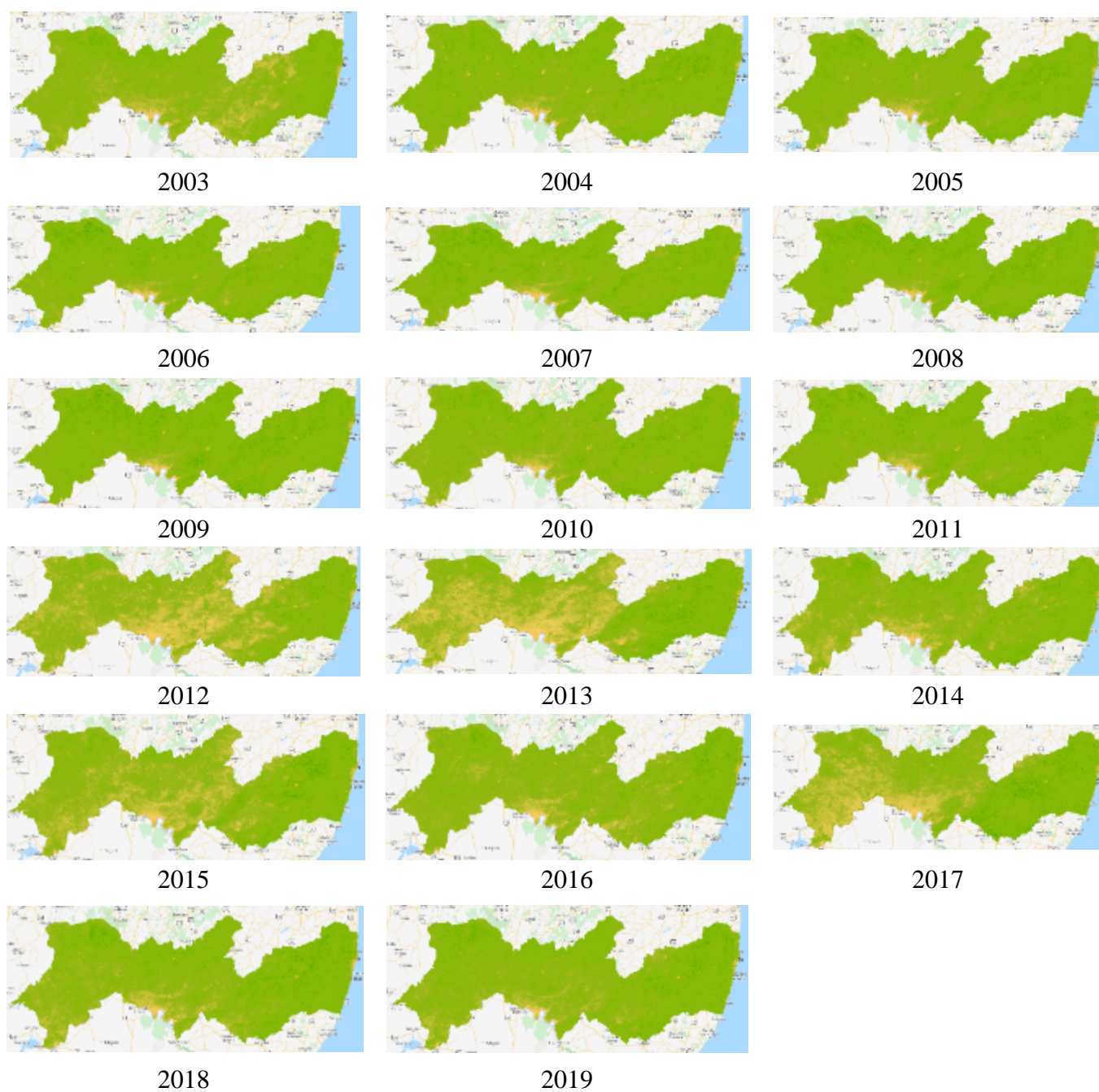


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

As imagens desse parâmetro para o estado de Pernambuco apresentaram predominâncias de tons verdes, indicando valores acentuados do vigor da vegetação (Figura 23). Contudo, não há uma diferença significativa entre as regiões da zona da mata e litoral e do semiárido, em especial nos anos úmidos do semiárido, a exemplo de 2009 a 2011. Por sua vez, nos anos secos, essa diferença se torna mais evidente. Além disso, observam-se as diferenças em relação à porção sul do Sertão, Sertão de São Francisco, e a porção mais ao norte, no Sertão Pernambucano. Inclusive, parte dessa região apresenta os menores valores para todos os anos avaliados.

Figura 23 - Distribuição espaço-temporal do EVI com valor máximo anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.





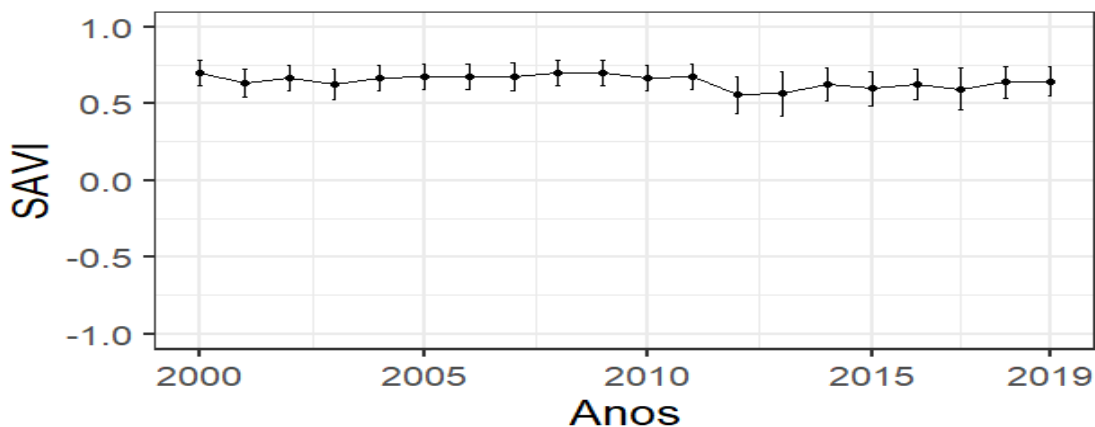
Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Seguindo a tendência dos índices de vegetação, ou seja, a média do estado de Pernambuco para o pixel máximo, na Figura 24, o SAVI também apresentou maior valor para os anos iniciais até 2011, enquanto que, no período de estiagem, a média caiu. Nos anos de 2000 a 2011, houve uma tendência de valores próximos a 0,66, com o ano de 2008 apresentando o valor mais elevado de 0,70. Todavia, no período de 2012 a 2017, os valores ficaram em torno de 0,59 e, nos anos de 2012 e 2013, atingiu os valores mais baixos de 0,55

e 0,56, respectivamente. Nos anos de 2018 e 2019, a média foi de 0,64 e 0,65, indicando uma tendência de aproximação aos valores dos anos iniciais (2000 a 2011).

O desvio padrão apresentou pequenas variações ao longo desse período, com valores mais baixos nos anos de 2000 a 2011, correspondendo a 0,08. Durante a estiagem, o desvio padrão aumentou para 0,11, devido ao efeito da precipitação na vegetação da região semiárida.

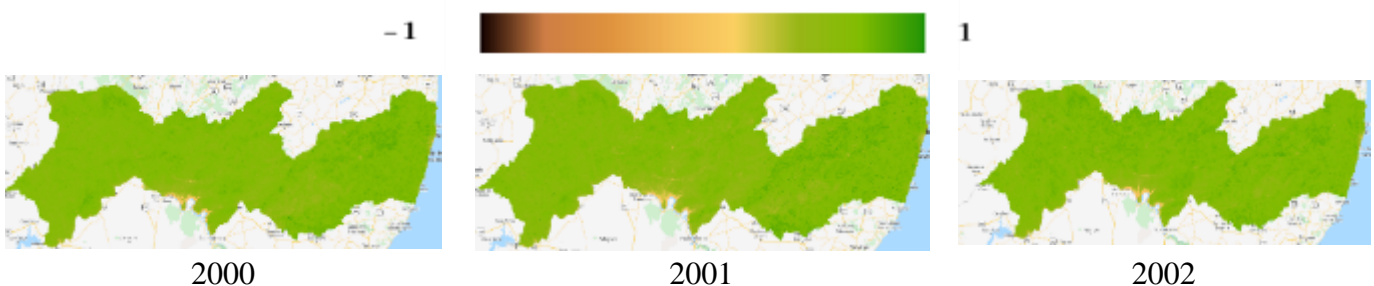
Figura 24- Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do SAVI com valor máximo anual do pixel.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

As imagens da distribuição do SAVI no estado, durante os anos de 2000 a 2019, estão na Figura 25, na qual se observa a mesma configuração dos parâmetros anteriores. Assim como o EVI, não há diferenças significativas entre as regiões litorâneas e interioranas nos anos considerados úmidos. Por outro lado, nos anos considerados secos, para o semiárido, há maior diferença na coloração nos mapas entre as regiões. Nota-se também uma área que mantém a condição em todos os anos, localizada na parte central e sul, sempre com os menores valores do índice, mesmo em anos considerados chuvosos.

Figura 25 - Distribuição espaço-temporal do SAVI com valor máximo anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.



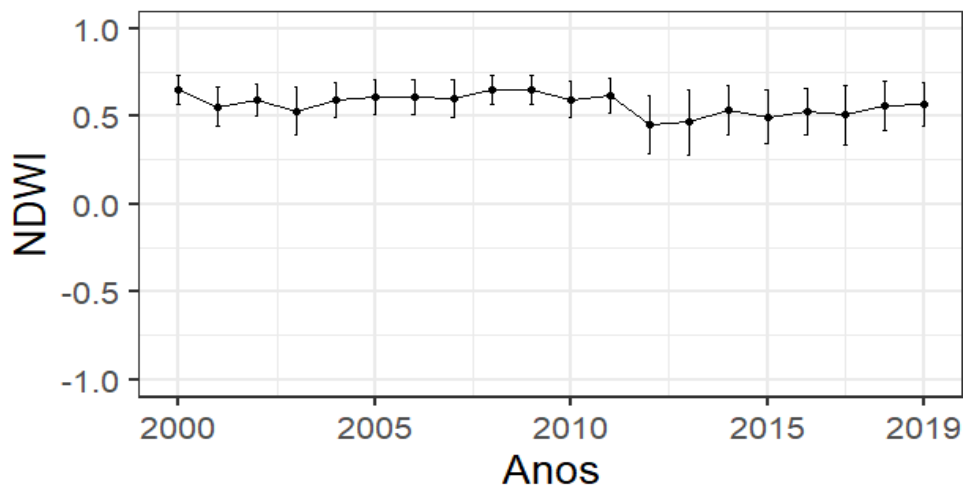


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 26 apresenta as médias e desvio padrão do valor máximo do pixel na área de estudo para o NDWI, com configuração semelhante aos índices de vegetação. Os anos de 2000, 2008 e 2009 apresentaram as maiores médias – NDWI de 0,65 –, mas a tendência durante os anos de 2000 a 2011 foi de 0,59. Por sua vez, no período da estiagem, a média dos anos ficou em torno de 0,5, sendo o menor valor do ano de 2012 com 0,45. Após esse período, percebe-se um aumento gradativo da média, com o ano de 2019 apresentando uma média de 0,56.

Ao analisar o desvio padrão, observou-se uma semelhança com os índices de vegetação, uma vez que o período de 2000 até 2011 possui menores desvios, em torno de 0,10, e nos anos de 2012 até 2017, há um aumento do desvio padrão, com valores em torno de 0,16.

Figura 26 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão do NDWI com valor máximo anual do pixel.

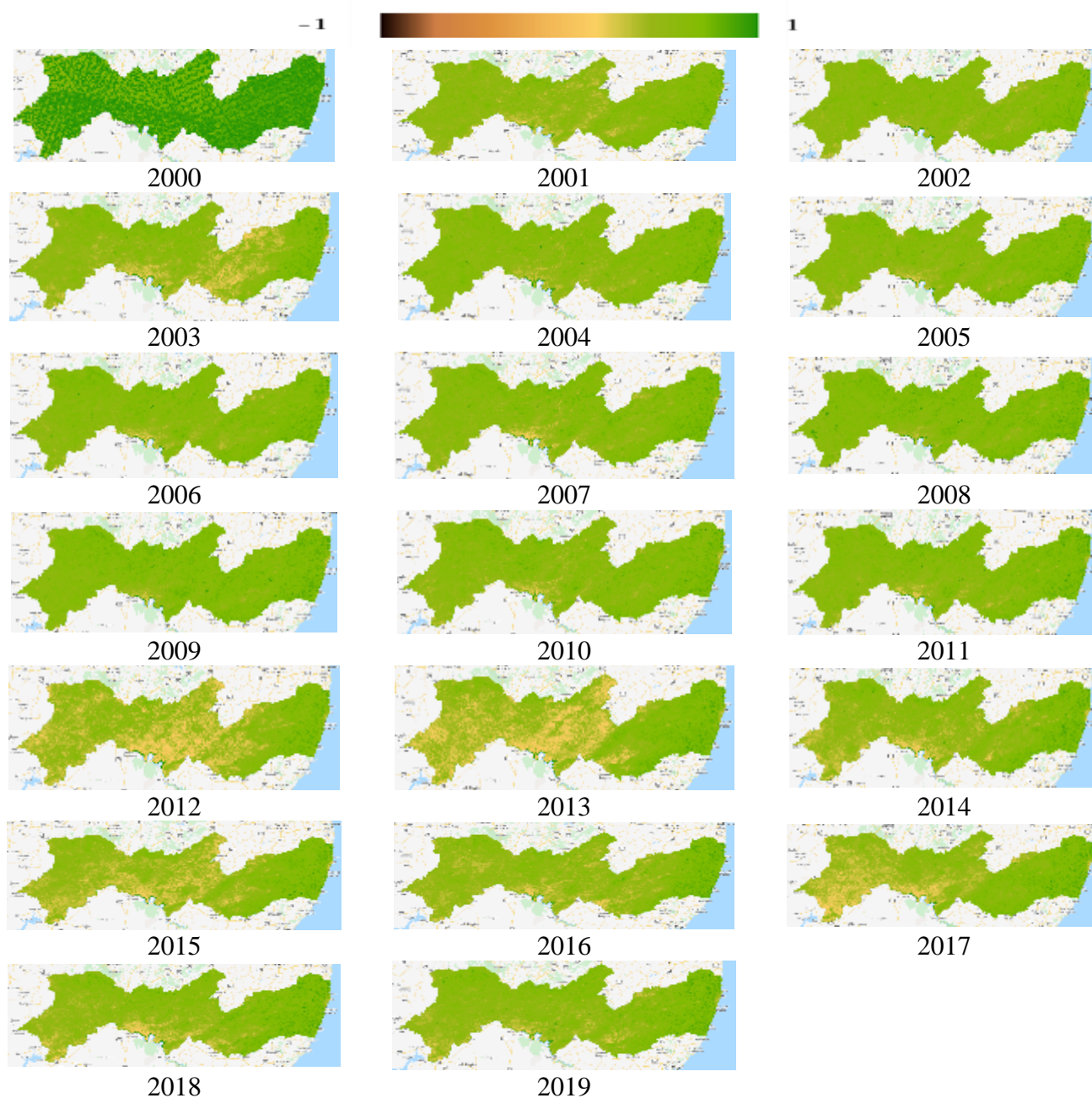


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 27 apresenta a distribuição espaço-temporal do NDWI para o estado de Pernambuco. Observou-se que a zona da mata e o litoral apresentam valores mais elevados desse índice, com uma coloração verde, em função dos maiores valores de precipitação. Enquanto na região do Sertão, verificou-se que um período de estiagem de 2012 a 2017, durante a qual os anos de 2012 e 2013 foram os mais críticos, observado pela maior coloração amarelada em quase toda a região. Nos anos seguintes, a partir de 2014, observa-se o efeito da estiagem, com a região sul apresentando maior fragilidade em função dos menores valores, marcado pela coloração mais amarela.

É importante destacar que o ano de 2000 apresentou uma configuração diferente dos anos seguintes, sugerindo algum tipo de contaminação. Essa configuração se deve ao ajuste dos sensores do satélite que havia sido lançado.

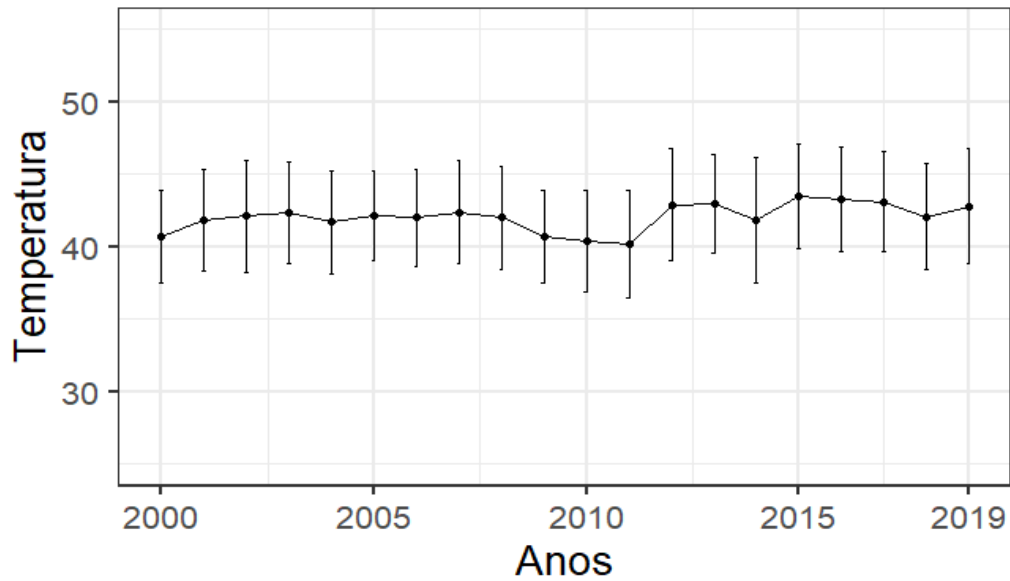
Figura 27 - Distribuição espaço-temporal do NDWI com valor máximo anual do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Constata-se, na Figura 28, que a média da temperatura máxima fica em torno dos 42°C no estado. Contudo, nos anos de 2009 a 2011, esses valores foram 40°C, os menores do período de estudo. Enquanto os anos de 2015 a 2017 foram os maiores, com 43°C, ocasionados pela estiagem que provocou uma redução da cobertura vegetal em parte considerável do estado e, conseqüentemente, o aumento da temperatura.

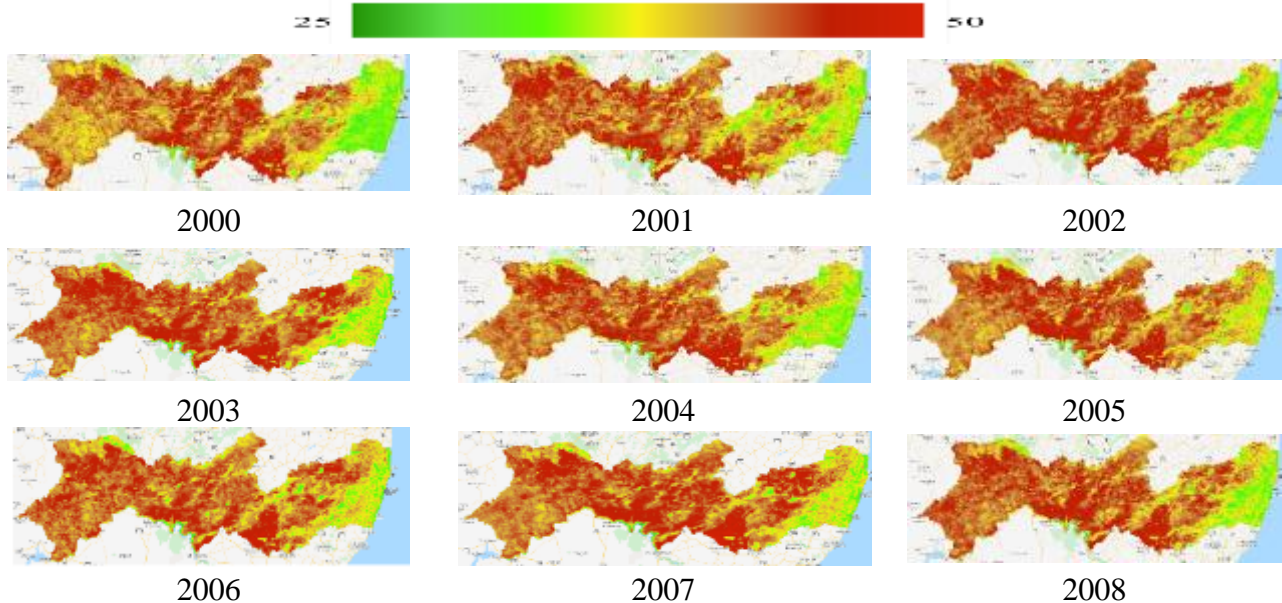
Figura 28 - Variabilidade quantitativa dos valores estatísticos média e desvio padrão da temperatura da superfície (°C) com valor máximo do pixel.

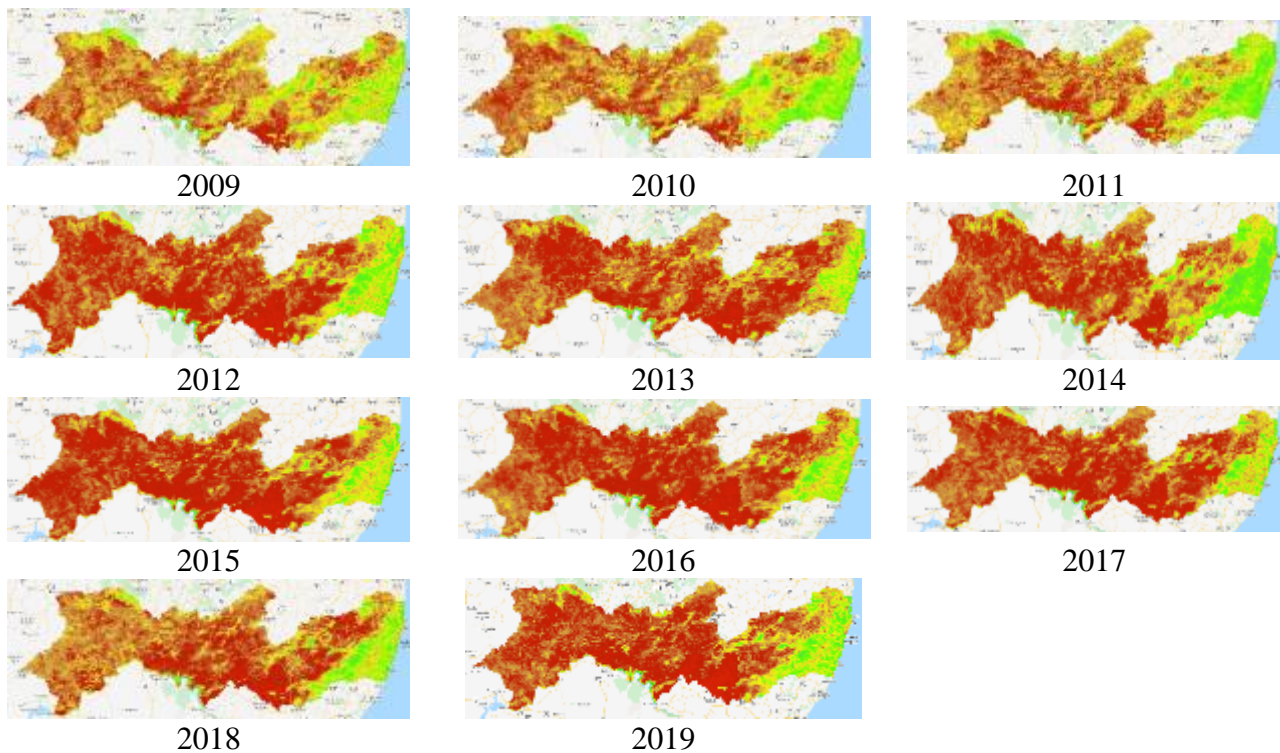


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 29 apresenta as imagens de temperatura no estado de Pernambuco. Nela verificam-se as diferenças entre a região litorânea, com menor temperatura e cor verde, e a continental, com maior temperatura e cor avermelhada. Observa-se também que os anos de 2009 a 2011 tiveram menores médias de temperatura máxima e as cores avermelhadas mais claras, enquanto nos anos 2015 até 2017, as cores são vermelhas escuras devido às maiores temperaturas.

Figura 29 - Distribuição espaço-temporal da temperatura da superfície (°C) com valor máximo do pixel para Pernambuco no período de 2000 a 2019.





Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Ao comparar os resultados obtidos pelas duas formas de redutores de imagens, a média e máxima dos pixels, verificou-se o mesmo padrão de distribuição ao longo dos anos. Na primeira década, 2000 a 2009, os valores se mantiveram próximos, junto com os anos de 2010 e 2011. Contudo, nos anos de 2012 a 2017, os parâmetros biofísicos de índice de vegetação e índice de água reduziram seus valores em função do período de estiagem que afetou o estado, em especial a região semiárida (Grupo 1). Enquanto a temperatura apresentou o comportamento oposto, com os primeiros anos marcando valores mais baixos e o período de estiagem com temperaturas mais altas.

Esses resultados também estão coerentes com os apresentados por Araújo et al. (2018) em estudo desenvolvido no Nordeste do Brasil. Os resultados dos autores constataram o aumento do NDVI com maiores precipitação e aumento da temperatura com menores valores de precipitação em escalas anuais.

Por outro lado, para o albedo com a redução do pixel médio anual, os resultados se mantiveram praticamente constantes, enquanto que, para a redução do pixel máximo anual, o comportamento foi variável e houve contaminação maior de nuvens e ruídos, em particular nas regiões de zona da mata e litoral (Grupo 2 e 3).

Isso ocorreu devido ao fato de essas regiões, zona da mata e litoral, apresentarem alta incidência de nuvens, o que pode gerar uma má interpretação dos dados, subestimando ou

superestimando os valores, uma vez que esses elementos aumentam a absorção e elevam a refletância da energia em determinadas regiões do espectro, em especial infravermelho (MORAES, 2002).

Os resultados obtidos pela estatística estiveram próximos dos encontrados por outros estudos (MATOS; CANDEIAS; TAVARES JUNIOR, 2013; RIBEIRO et al., 2015; SANTOS et al., 2015; SOUZA et al., 2015), em especial os que usaram, como critério de redução da imagem, a média do pixel. Os resultados encontraram para áreas de vegetação, em especial áreas de caatinga, valores médios do NDVI com variação entre 0,2 e 0,7. Por sua vez, o albedo apresentou um valor próximo 0,16, mas variando de 0,11 até 0,2, enquanto a temperatura da superfície ficou na faixa de 30 até 40 °C. Dessa forma, o uso de um redutor máximo não é o mais indicado para uma análise mais fidedigna do comportamento da superfície terrestre, porque está mais predisposto à contaminação das nuvens e ruídos.

Ao observar os mapas dos parâmetros biofísicos, nota-se uma região entre os municípios de Belém de São Francisco, Floresta, Petrolândia, Tacaratu, Jatobá, Carnaubeira da Penha e Itacuruba que apresenta uma condição constante ao longo do tempo e crítica, sempre diferente das outras áreas do semiárido. Essa área apresenta valores de albedo mais alto, índice de vegetação mais baixo e temperatura da superfície mais alta. Com o intuito de entender melhor a característica dessa área, desenvolveu-se um estudo detalhado dessa região no tópico 6.3.

Um outro ponto a destacar são as projeções de mudanças climáticas apresentadas no Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas - PBMC (SOUZA; MANZI, 2014), que indicam, em um cenário futuro de aquecimento global, a redução da precipitação entre ~5% e ~20%, associada a um aumento da temperatura de 1°C a 5°C. Essa condição levará ao aumento das taxas de evaporação e evapotranspiração em conjunto com mais eventos extremos de precipitação (LELIS et al., 2011).

Os resultados obtidos reiteram a importância da precipitação na regulação dos parâmetros biofísicos, para exemplificar esse comportamento basta comparar os valores do NDVI e da Temperatura da superfície entre um período chuvoso, como foram os anos 2009 até 2011, com o período de estiagem, 2012 a 2016. Em números absolutos, usando como referência o critério de redução do pixel médio, do período chuvoso para a estiagem, houve uma diminuição do NDVI em 0,09 e o aumento da temperatura em 2,70°C, o que corresponde, respectivamente, à diminuição de 19 % e ao aumento de 9 %.

Diante dessas perspectivas, em particular do aumento de eventos extremos de precipitação, a tendência é que o semiárido se torne mais árido, ocasionando a redução dos recursos hídricos, da vegetação, da biodiversidade, etc. (LACERDA, 2015). Além disso, o aumento da temperatura e as precipitações mais irregulares, em conjunto com atividades antrópicas, deverão aumentar as áreas susceptíveis à desertificação (BRITO et al., 2018). Diante disso, o ecossistema não conseguirá manter os serviços oriundos da sua condição e, assim, comunidades não poderão usufruir de um ambiente equilibrado.

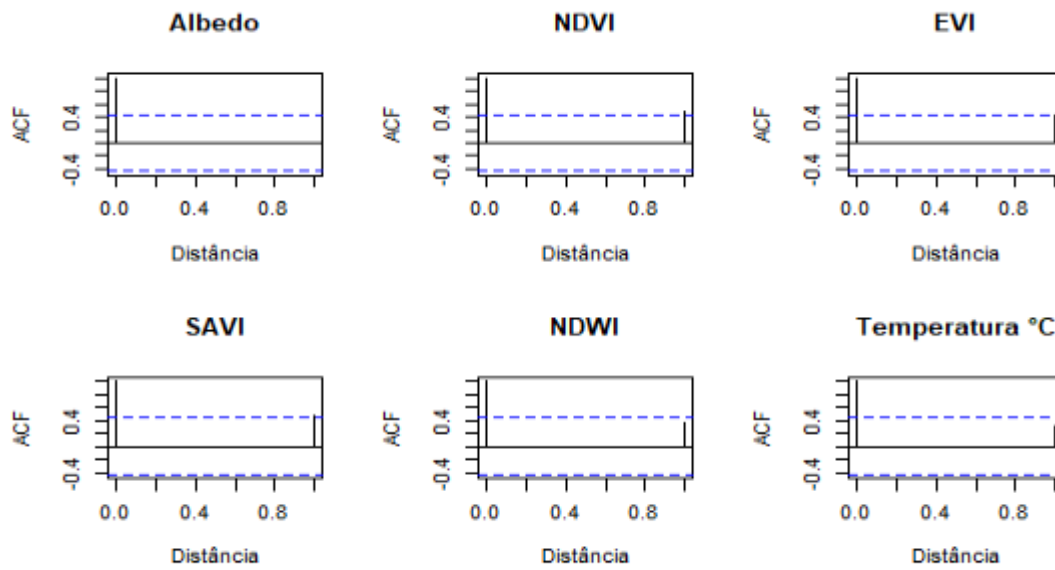
Portanto, os impactos deverão atingir a agricultura de subsistência, agroindústria e agropecuária, saúde humana e geração de empregos (SANTOS et al., 2019). No que tange às atividades agropecuárias, fortemente dependentes da precipitação, esse setor deverá ser o mais afetado pelas mudanças climáticas (MARENGO; TORRES; ALVES, 2017). Como consequência dessa situação, deverão ocorrer movimentos migratórios maiores para regiões mais desenvolvidas ou conglomerados urbanos (OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2016).

4.2.3 Análise de Tendência Temporal dos Parâmetros Biofísicos

Com intuito de verificar se houve ou não alterações significativas na forma de cobertura do solo no período avaliado, verificou-se a existência de tendências nos parâmetros biofísicos, seja de aumento ou redução, no estado de Pernambuco ao longo dos anos de 2000 até 2019. Para tanto, aplicou-se um teste não-paramétrico de tendência temporal de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) aos resultados da média dos parâmetros biofísicos.

A Figura 30 apresenta o teste da função de autocorrelação dos parâmetros biofísicos das imagens reduzidas por ano com a média do pixel. Nela, as variáveis são, na maioria, independentes e homogêneas, com exceção do NDVI e do SAVI. Esses dois últimos parâmetros apresentam uma pequena autocorrelação, mas, ainda assim, significativa. Dessa forma, os testes de tendência de Mann-Kendall foram ajustados para cada variável, conforme metodologia de Hamed e Rao (1998).

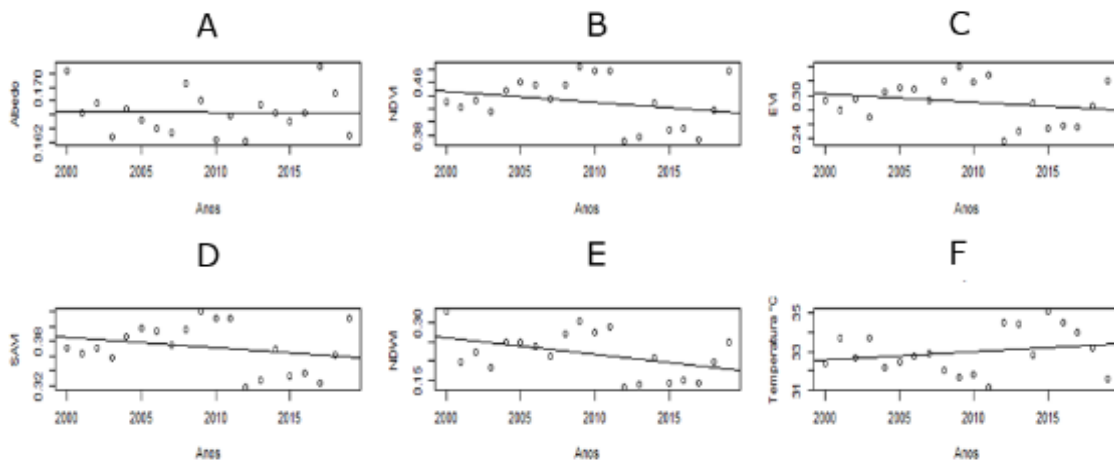
Figura 30 – Autocorrelação com redução do pixel médio dos parâmetros biofísicos.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 31 apresenta os gráficos de dispersão dos parâmetros biofísicos ao longo dos anos de 2000 até 2019 com a linha de tendência para cada um. Observou-se que as variáveis dos índices de vegetação (NDVI, EVI e SAVI) e de NDWI apresentam comportamento semelhante ao longo dos anos e tendência de decrescimento, enquanto o albedo tende a ser constante. A temperatura da superfície, por sua vez, apresenta um comportamento inverso aos índices de vegetação e tendência de crescimento.

Figura 31 – Regressão Linear Simples dos Parâmetros Biofísicos com Tempo: (A) Albedo; (B) NDVI; (C) EVI; (D) SAVI; (E) NDWI; (F) Temperatura da Superfície.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Tabela 6 apresenta os valores dos coeficientes do teste de Mann-Kendall pelos quais verifica-se a tendência de decrescimento das variáveis analisadas (Albedo, NDVI, EVI, SAVI e NDWI) e crescimento da temperatura da superfície, em ambas análises. Contudo, os resultados dos testes de significância foram não significativos, dessa forma, com a redução anual para o critério da média do pixel, não há mudanças significativas dos parâmetros biofísicos. Uma possível justificativa para a ausência de tendência a mudanças é a análise da série de 20 anos (2000 até 2019), quando o recomendado é, no mínimo, 30 anos de avaliação.

Tabela 6 – Estatística do teste de Mann-Kendall com a redução dos pixels médio.

Testes Estatísticos	Albedo	NDVI	EVI	SAVI	NDWI	Temperatura da Superfície
Tau Kendall (τ)	-0,042 ^{ns}	-0,074 ^{ns}	-0,053 ^{ns}	-0,084 ^{ns}	-0,168 ^{ns}	0,095 ^{ns}
Declividade (B)	-0,00004	-0,0008	-0,0005	-0,00060	-0,0036	0,0252

Códigos de Significância: ** Ao nível de 1%; * Ao nível de 5%; ^{ns} Não significativo

Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

É importante destacar que os índices de vegetação possuem uma relação inversa ao albedo e à temperatura da superfície (MATOS; CANDEIAS; TAVARES JUNIOR, 2013). No entanto, os resultados obtidos nos grupos não apresentam esse comportamento entre os índices de vegetação e o albedo da superfície. Por outro lado, a relação entre os índices de vegetação e a temperatura da superfície se comportam como esperado. Provavelmente, essa diferença de relação com o albedo está relacionada ao ângulo de incidência da radiação, ao tipo de cobertura da superfície (SANTOS *et al.*, 2017a) ou à presença maior de nuvens na região, que alteram os valores desse parâmetro.

Dessa maneira, considerando que grandes alterações da cobertura terrestre modificam os resultados da estatística descritivas, pode-se afirmar que não houve, no período estudado, alterações significativas no uso e ocupação de solo e supressão da vegetação que provocasse mudanças nos parâmetros biofísicos. Apesar das diversas mudanças que ocorreram durante o período de avaliação, é possível que a resolução espacial dos produtos utilizados (500 m e 1000 m) não tenha conseguido detectar as alterações da cobertura do solo. Considerando as condições de obtenção dos resultados, as mudanças que ocorreram nos resultados são ocasionadas, em geral, pela precipitação.

Portanto, é importante ressaltar a necessidade de análises mais locais e com melhores resoluções espaciais, com uso de análises das tendências ambientais em séries temporais de

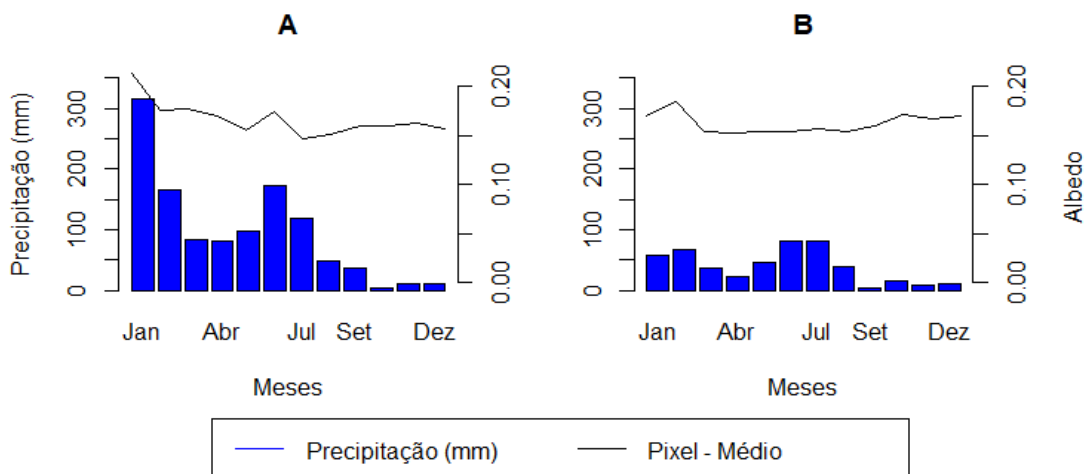
produtos oriundos do sensoriamento remoto em nível do pixel (NANZAD *et al.*, 2019; ZOUNGRANA *et al.*, 2018) para detectar regiões com maiores mudanças nesse período.

4.2.4 Sazonalidade dos Parâmetros Biofísicos de Pernambuco nos anos Extremos

Apesar de não haver tendência de mudanças ambientais no estado de Pernambuco no período de 2000 a 2019, fica evidente como o regime de precipitação influencia o comportamento dos parâmetros biofísicos. Nesse sentido, é fundamental a compreensão da sazonalidade dos parâmetros em regimes de precipitação extremos, muito chuvoso ou muito seco. Com isso, investigou-se, a partir dos 45 postos pluviométricos, a sazonalidade nos anos de 2004, muito chuvoso, e 2012, muito seco, como classificados na Tabela 4, para compreender a correlação da precipitação com os parâmetros.

Para essa análise, utilizou-se como critério de redução a média do pixel em nível mensal, visto que a máxima apresenta maior contaminação de nuvens e ruídos. Assim, a Figura 32 apresenta o comportamento médio do albedo em todo o estado de Pernambuco com relação à média de precipitação do mês. O valor do albedo, com a redução do pixel médio, foi em torno de 0,16, tanto no ano chuvoso e quanto no ano seco.

Figura 32 – Média mensal do albedo e média do total mensal de precipitação de Pernambuco: (A) 2004; (B) 2012.

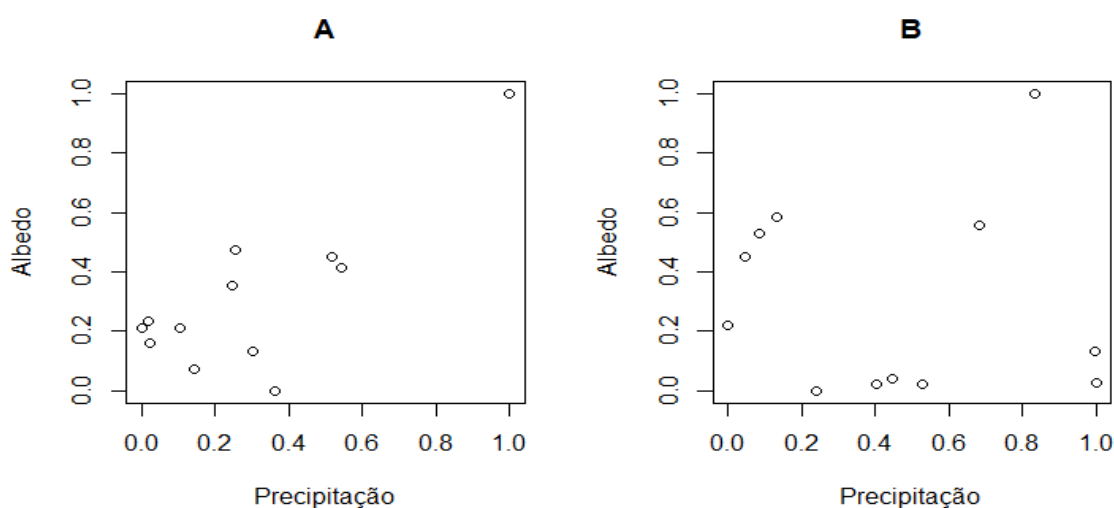


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Durante os dois anos avaliados, o valor do albedo tendeu a diminuir até setembro para voltar a subir gradativamente até dezembro. Alves et al. (2014) relatam que essa variação é função da estação do ano. O primeiro semestre é o período chuvoso no estado, com a quadra de fevereiro até maio na região do interior e abril até julho na região de Zona da mata. Dessa maneira, o albedo apresenta uma contaminação maior de nuvens no primeiro semestre, o que pode justificar valores superiores nesse período, em especial no ano chuvoso (2004).

A Figura 33 mostra a dispersão do albedo com a precipitação e a relação positiva entre as variáveis, provavelmente, devido a uma maior presença de nuvens – o que eleva a reflectância e causa aumento do albedo. Na Tabela 7, a partir dos valores dos coeficientes de correlação, percebeu-se a correlação com valores baixos e não significativos, ao mínimo no nível de 5%, tanto no período seco quanto no chuvoso.

Figura 33 – Diagrama de dispersão do albedo e média do total mensal de precipitação de Pernambuco normalizados: (A) 2004; (B) 2012.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Tabela 7 – Coeficientes de correlação e método de correlação para os anos 2004 e 2012 entre albedo e precipitação

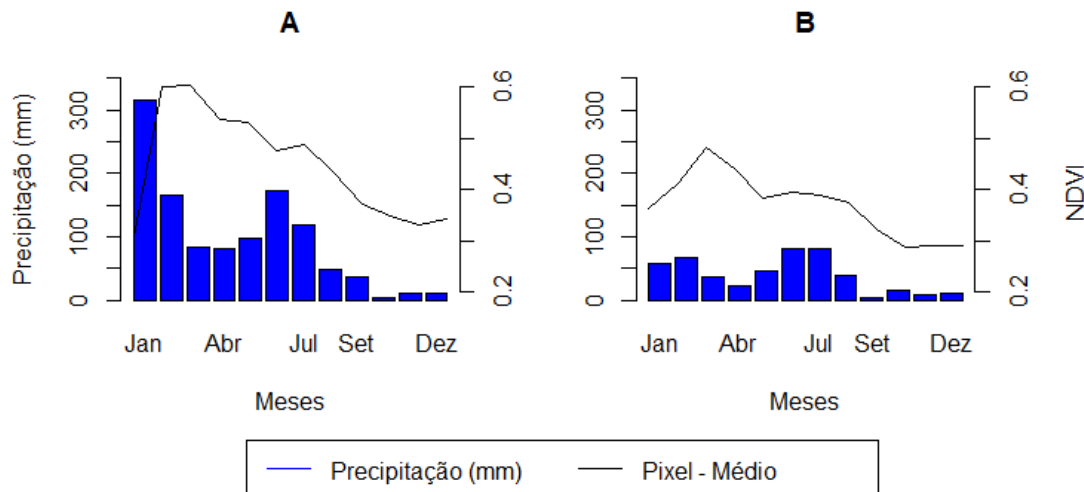
Redução da Média do Pixel		
Ano	Correlação	Método de Correlação
2004	0,27 ^{ns}	Kendall
2012	0,16 ^{ns}	Pearson

Códigos de Significância: ** Ao nível de 1%; * Ao nível de 5%; ^{ns} Não significativo

Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 34 apresenta a relação do NDVI e da precipitação. Para o período mais seco do ano (segundo semestre) a relação apresenta valores menores que o período chuvoso. Em relação ao comportamento do NDVI em ano chuvoso e em ano seco, há uma diferença nos valores do parâmetro com 2004 apresentando valores mais elevados que 2012.

Figura 34 – Média mensal do NDVI e média do total mensal de precipitação de Pernambuco: (A) 2004; (B) 2012.

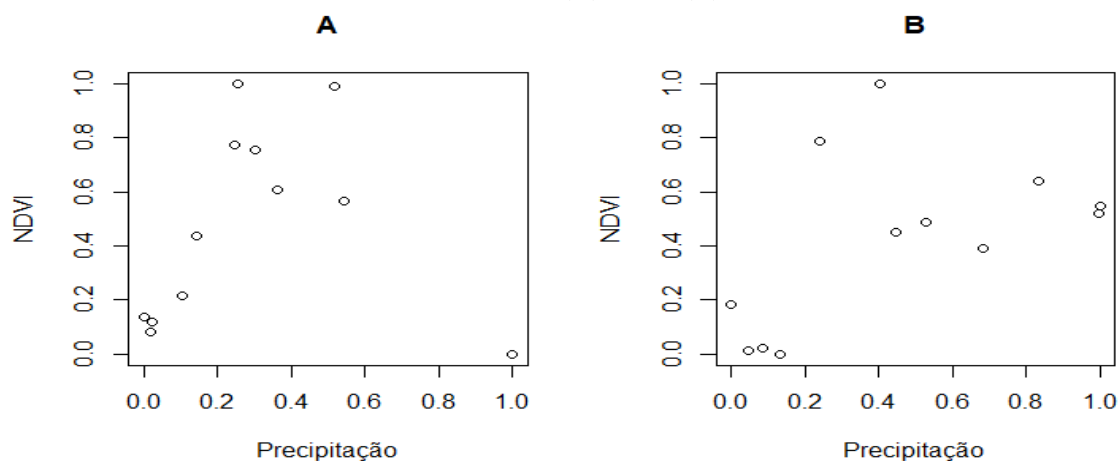


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Em 2004, janeiro foi o mês com menor valor (0,31) e março com maior valor (0,60), para redução com pixel médio. No ano de 2012, com a redução da média do pixel, novembro obteve o menor NDVI, na ordem de 0,29, e março o mês de maior valor com 0,48.

A Figura 35 apresenta os gráficos de dispersão entre NDVI e precipitação, por meio do qual se percebeu a relação positiva entre elas. Ao analisar as correlações e sua significância, na Tabela 8, o NDVI apresentou uma relação mais forte com a precipitação no ano mais seco (2015), contudo as correlações não foram significativas.

Figura 35 – Diagrama de dispersão do NDVI e média do total mensal de precipitação Pernambuco normalizados: (A) 2004; (B) 2012.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Tabela 8 – Coeficientes de correlação e método de correlação para os anos 2004 e 2015 entre o NDVI e precipitação.

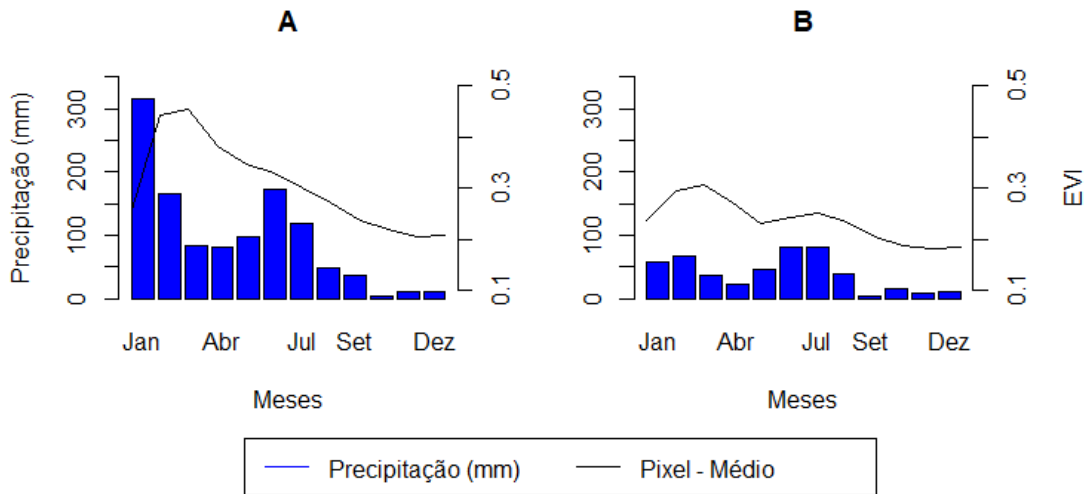
Ano	Redução da Média do Pixel	
	Correlação	Método de Correlação
2004	0,12 ^{ns}	Pearson
2012	0,43 ^{ns}	Pearson

Códigos de Significância: ** Ao nível de 1%; * Ao nível de 5%; ^{ns} Não significativo

Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 36 apresenta o comportamento da média do EVI e da precipitação ao longo dos meses, evidenciando uma relação entre as variáveis. Entre os anos avaliados, o ano mais chuvoso (2004) apresentou valores mais elevados que o ano mais seco (2012), como o NDVI. O ano de 2004 apresentou o maior valor no mês de março com 0,45 e o menor valor em dezembro com 0,21. No ano de 2012, por sua vez, o maior valor foi de 0,30, em março, e o valor mais baixo ocorreu em novembro com 0,18.

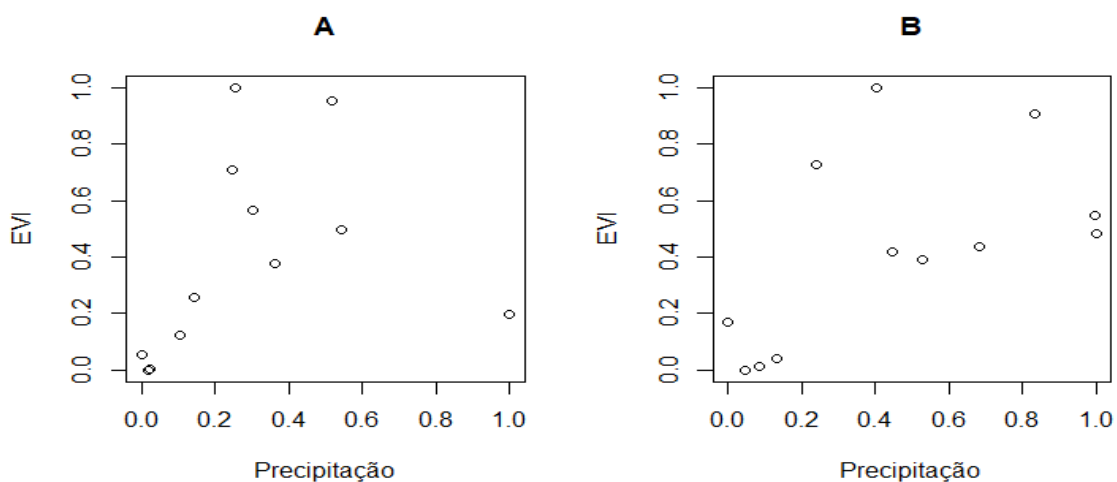
Figura 36 – Média mensal do EVI e média do total mensal de precipitação de Pernambuco: (A) 2004; (B) 2012.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Na Figura 37, observou-se a relação positiva do EVI com a precipitação em ambos os anos. Ao se verificar correlação e significância (Tabela 8), o ano mais seco, 2012, apresentou maior correlação com a precipitação, contudo ela não foi significativa nos dois anos avaliados.

Figura 37 – Diagrama de dispersão do EVI e média do total mensal de precipitação de Pernambuco normalizados: (A) 2004; (B) 2012.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Tabela 9 – Coeficientes de correlação e método de correlação para os anos 2004 e 2012 entre o EVI e precipitação.

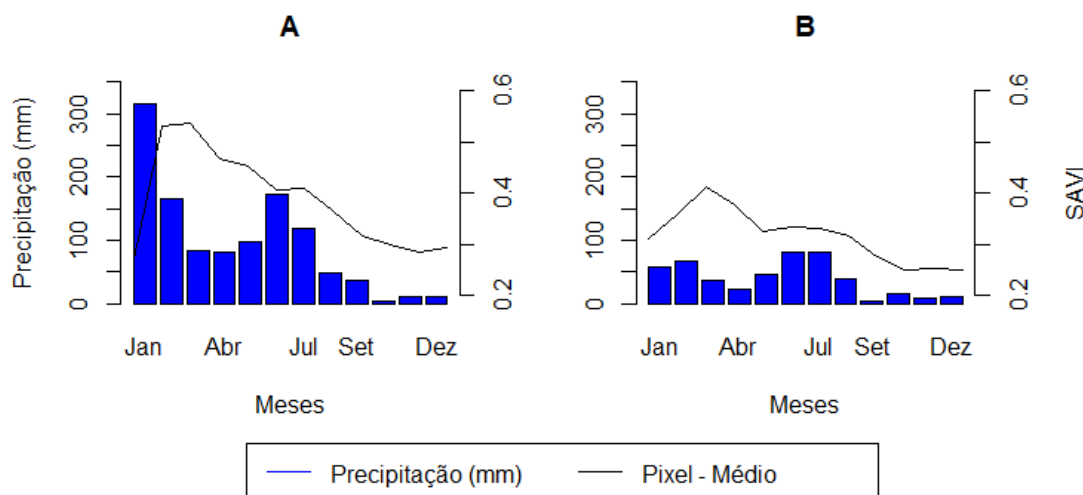
Redução da Média do Pixel		
Ano	Correlação	Método de Correlação
2004	0,32 ^{ns}	Pearson
2012	0,54 ^{ns}	Pearson

Códigos de Significância: ** Ao nível de 1%; * Ao nível de 5%; ^{ns} Não significativo

Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 38 apresenta o comportamento da média do SAVI e da precipitação ao longo dos meses do ano, verificando-se uma relação entre as variáveis e o mesmo comportamento com outros dois índices de vegetação. Entre os anos avaliados, o ano mais chuvoso (2004) apresentou maiores valores que o ano mais seco (2015). No ano de 2004, o valor mais alto foi de 0,63 no mês de março, e o menor, em janeiro, de 0,27. Porém, no ano de 2012, o maior valor foi de 0,41, em março, e o menor valor ocorreu em outubro com 0,25.

Figura 38 – Média mensal do SAVI e média do total mensal de precipitação de Pernambuco: (A) 2004; (B) 2012.

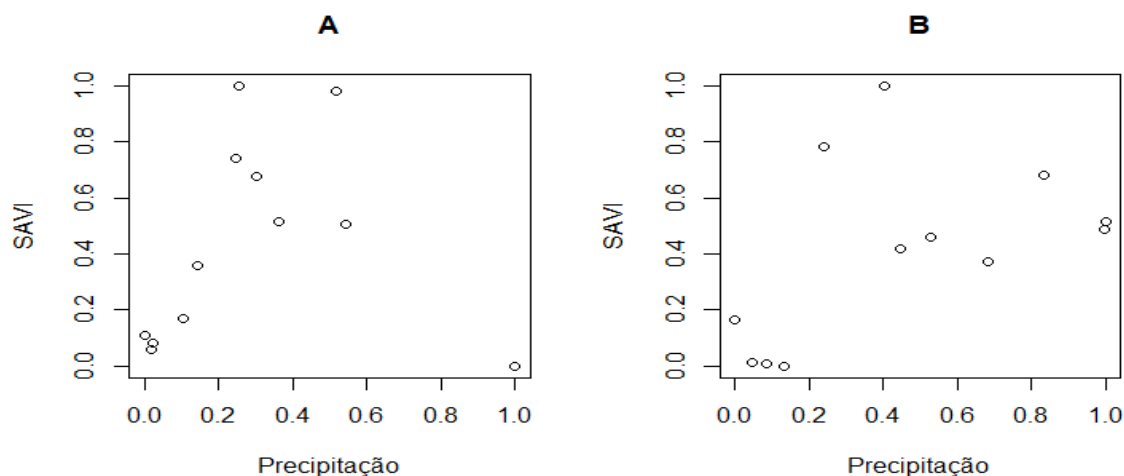


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 39 apresenta a relação do SAVI com a precipitação, em ambos os anos, observou-se uma relação positiva. Quanto à correlação e sua significância (Tabela 9), o ano

mais seco (2015) apresentou maior correlação com a precipitação, mas, em ambos os anos, esta não foi significativa.

Figura 39 – Diagrama de dispersão do SAVI e média do total mensal de precipitação de Pernambuco normalizados: (A) 2004; (B) 2012.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Tabela 10 – Coeficientes de correlação e método de correlação para os anos 2004 e 2012 entre o SAVI e a precipitação.

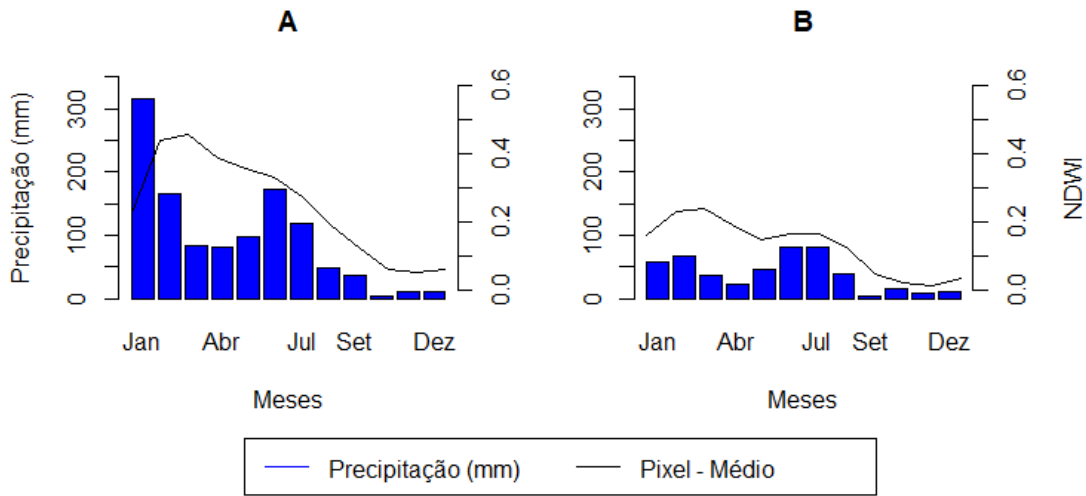
Ano	Redução da Média do Pixel	
	Correlação	Método de Correlação
2004	0,14 ^{ns}	Pearson
2012	0,41 ^{ns}	Pearson

Códigos de Significância: ** Ao nível de 1%; * Ao nível de 5%; ^{ns} Não significativo

Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 40 apresenta o comportamento da média do NDWI e da precipitação ao longo dos meses. Entre os anos avaliados, o ano mais chuvoso (2004) apresentou valores mais elevados do que o ano mais seco (2012), mostrando uma diferença visível entre o semestre chuvoso (1º Semestre) e seco (2º Semestre). Para o ano de 2004, o maior valor foi de 0,45, no mês de março, e o menor valor foi em janeiro com 0,05. Enquanto que no ano de 2012, o maior valor foi de 0,24 em março e o menor valor ocorreu em novembro com 0,01.

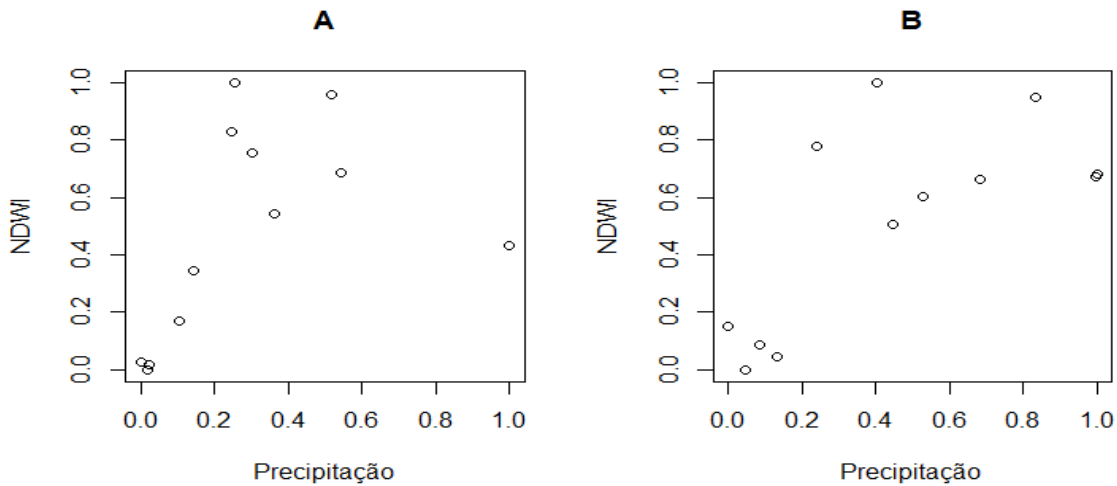
Figura 40 – Média mensal do NDWI e média do total mensal de precipitação de Pernambuco: (A) 2004; (B) 2012.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 41 apresenta a relação do NDWI com a precipitação, que apresenta relação positiva. Quanto à correlação e sua significância (Tabela 10), o ano mais seco (2015) apresentou maior correlação com a precipitação, inclusive, sendo significativa.

Figura 41 – Diagrama de dispersão do NDWI e média do total mensal de Pernambuco normalizados: (A) 2004; (B) 2012.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Tabela 11 – Coeficientes de correlação e método de correlação para os anos 2004 e 2012 para o NDWI e precipitação.

Ano	Redução da Média do Pixel	
	Correlação	Método de Correlação
2004	0,48 ^{ns}	Pearson
2012	0,69 [*]	Pearson

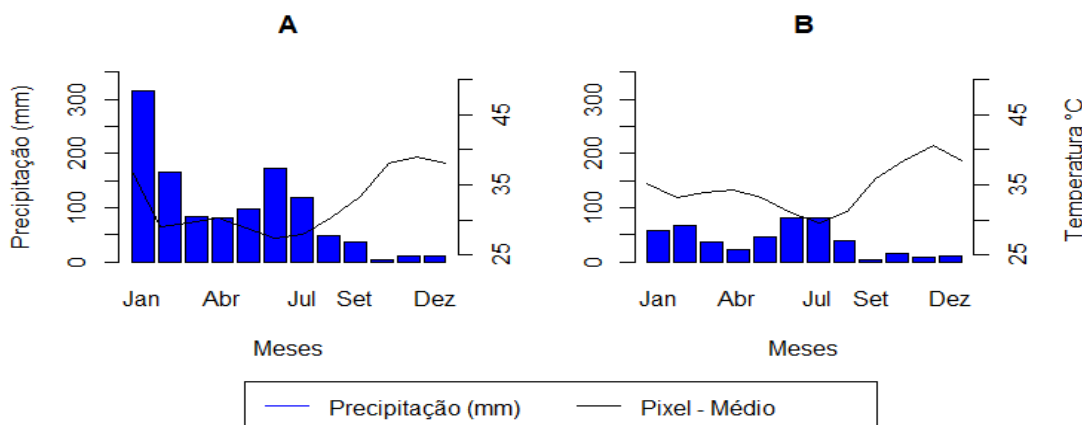
Códigos de Significância: ** Ao nível de 1%; * Ao nível de 5%; ^{ns} Não significativo

Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Ao analisar o comportamento da temperatura da superfície, os anos avaliados mostraram um comportamento semelhante, com o início e final de ano com maiores valores e menores valores próximos ao mês de junho (Figura 42). Coincidindo com o período de verão e inverno da região de estudo.

O ano de 2004 apresentou o maior valor, 38,93 °C, em novembro, e o menor valor, 27,31 °C, em junho, dessa forma, a amplitude térmica anual foi de 11,62° C. Por sua vez, o ano de 2012 teve o maior valor de 40,58 °C, em novembro, e o menor valor ocorreu em julho com 29,58 °C, sendo a amplitude 11,00°C.

Figura 42 – Média mensal da temperatura da superfície e média do total mensal de precipitação de Pernambuco: (A) 2004; (B) 2012.

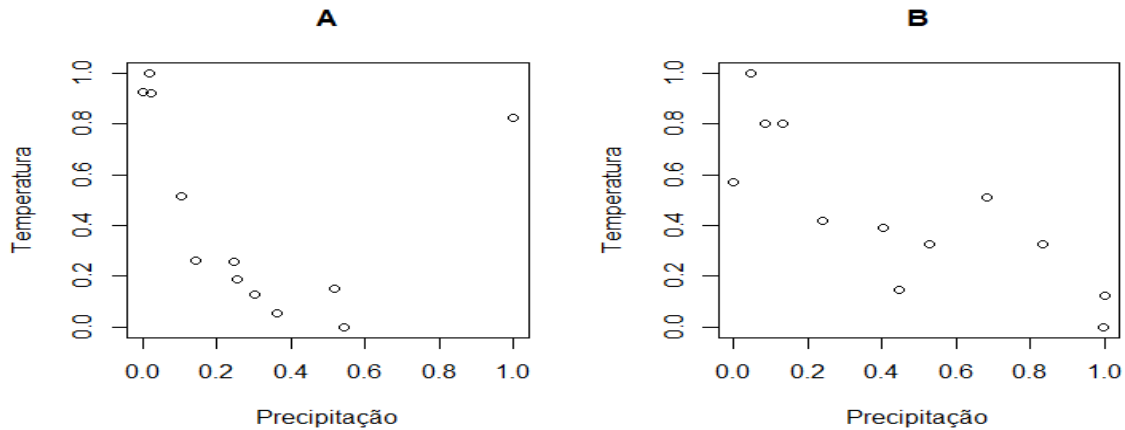


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 43 apresenta a relação da temperatura da superfície com a precipitação, em ambos os anos, e os tipos de redução. Foi verificada uma relação negativa. Quanto à

correlação e sua significância (Tabela 11), o ano mais seco (2012) apresentou correlação mais forte e significativa com a precipitação.

Figura 43 – Diagrama de dispersão da temperatura da superfície e média do total mensal de precipitação de Pernambuco normalizados: (A) 2004; (B) 2012.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Tabela 12 – Coeficientes de correlação e método de correlação para os anos 2004 e 2012 para a temperatura e precipitação

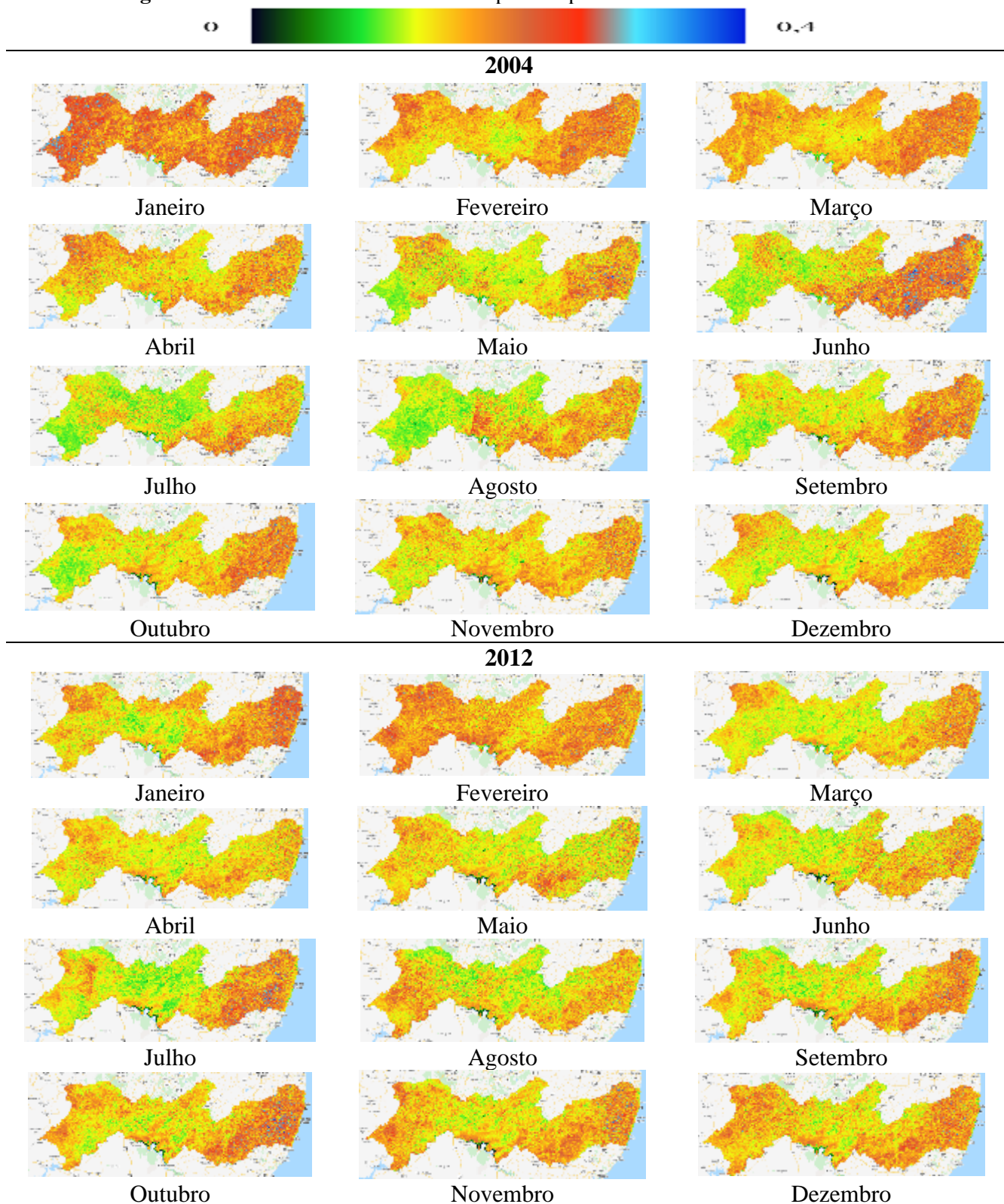
Ano	Redução da Média do Pixel	
	Correlação	Método de Correlação
2004	-0,28 ^{ns}	Pearson
2012	-0,75**	Pearson

Códigos de Significância: ** Ao nível de 1%; * Ao nível de 5%; ^{ns} Não significativo

Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

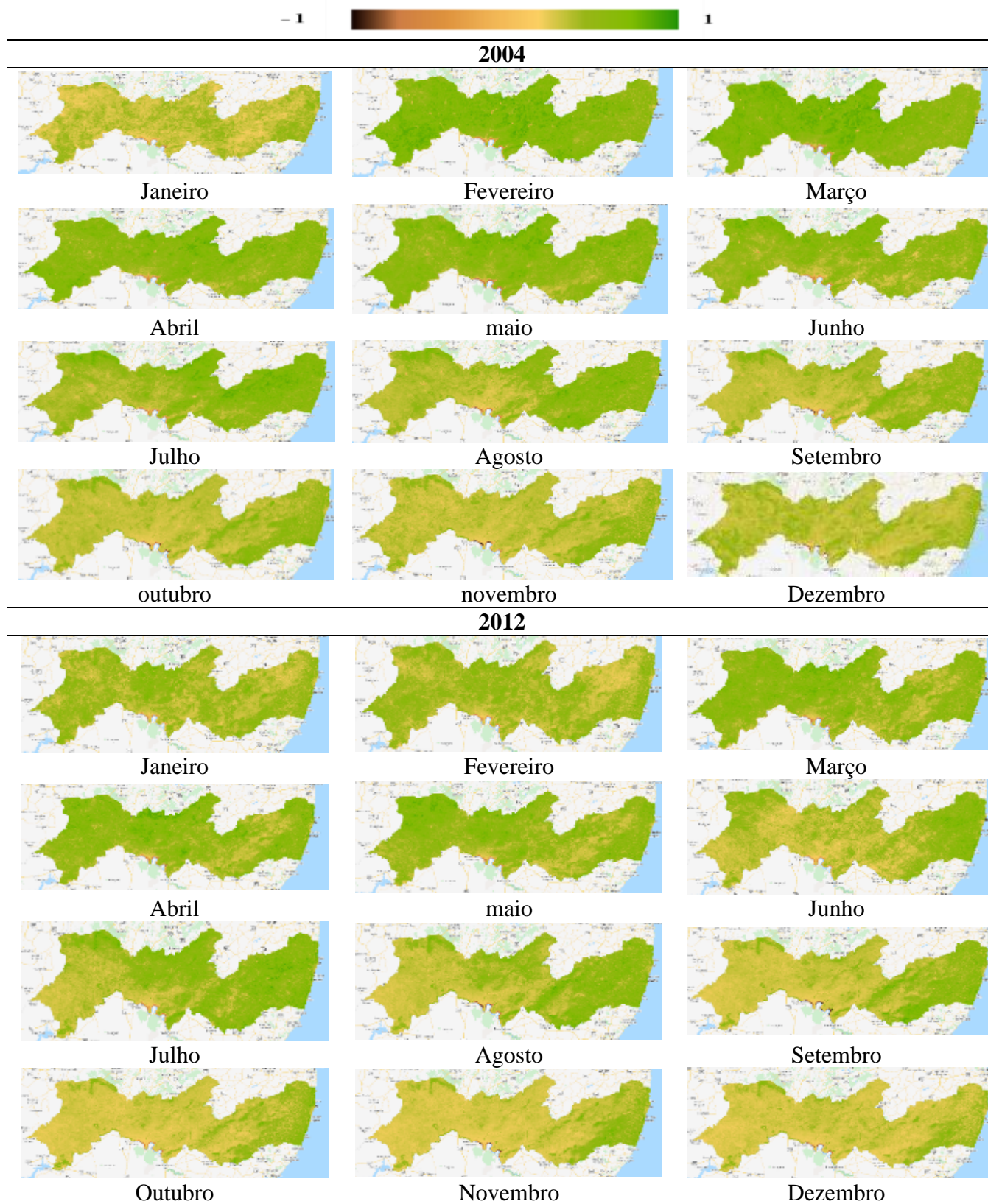
Como os índices de vegetação (NDVI, EVI e SAVI) e o índice de água (NDWI) apresentaram um comportamento semelhante ao longo dos meses. Foi, então, feita a escolha de um único índice para representar o comportamento espacial da vegetação ao longo dos meses. Dessa forma, para compreender melhor as diferenças dos parâmetros biofísicos ao longo dos meses, as Figuras 44, 45 e 46, apresentam os mapas temáticos do albedo, NDVI e temperatura da superfície.

Figura 44 – Sazonalidade do albedo da superfície para Pernambuco nos anos de 2004 e 2012.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Figura 45 – Sazonalidade do NDVI para Pernambuco nos anos de 2004 e 2012.

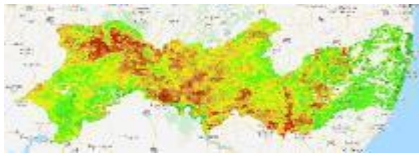


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Figura 46 – Sazonalidade da temperatura da superfície (°C) para Pernambuco nos anos de 2004 e 2012.



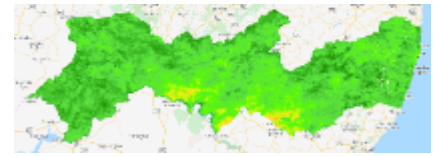
2004



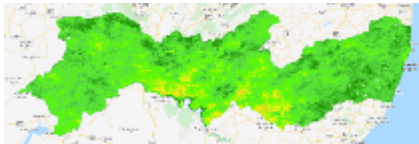
Janeiro



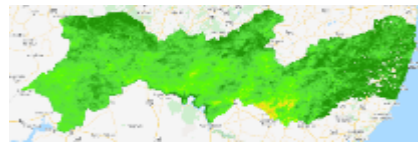
Fevereiro



Março



Abril



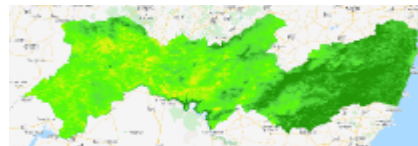
Maio



Junho



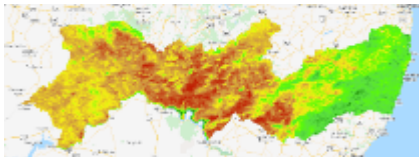
Julho



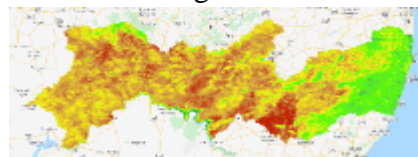
Agosto



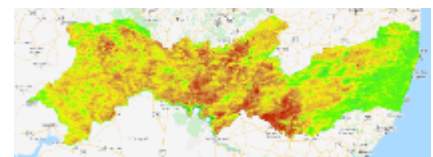
Setembro



Outubro

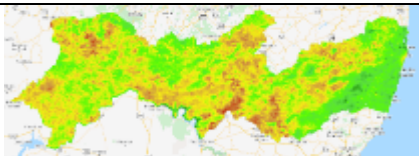


Novembro

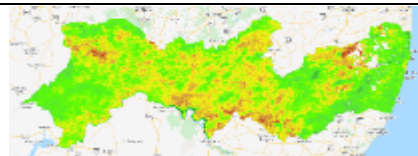


Dezembro

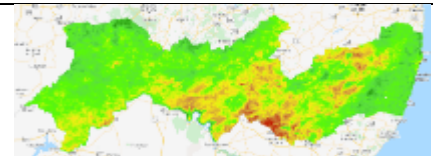
2012



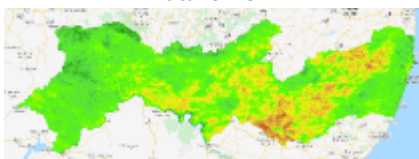
Janeiro



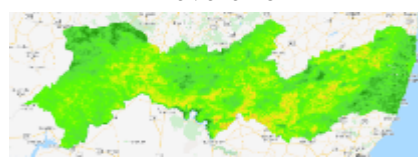
Fevereiro



Março



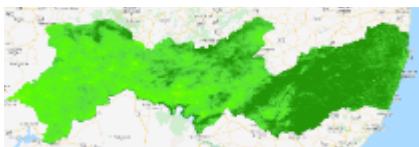
Abril



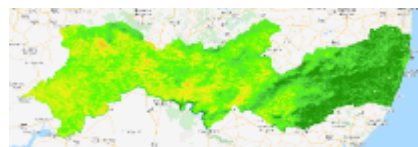
Maio



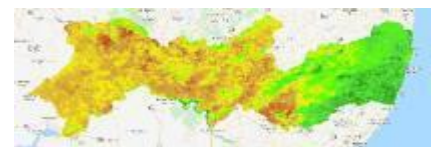
Junho



Julho



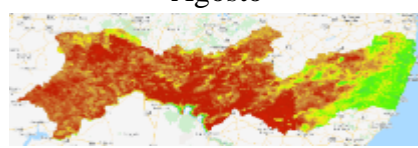
Agosto



Setembro



Outubro



Novembro



Dezembro

Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Os mapas temáticos dos parâmetros biofísicos (Figuras 44, 45 e 46) demonstram como a região semiárida apresenta maior fragilidade com os menores valores do índice de vegetação e as maiores temperaturas. O período mais crítico se concentra no último trimestre do ano e estende-se até o início do ano seguinte, enquanto a região da zona da mata apresenta maiores valores de albedo em função da maior incidência de nuvens.

Os resultados também demonstraram que a precipitação influencia no comportamento dos parâmetros biofísicos, em especial na região de semiárido. Rodrigues et al. (2009) destacam que no semiárido a vegetação é dependente do regime de precipitação e, quando ocorre, eleva o vigor da vegetação e aumento da massa verde.

Contudo, há alta correlação dos índices de vegetação com a precipitação (SOUZA et al., 2014), o que não foi encontrado nesses resultados. Provavelmente, essa condição é devido ao fato de ter-se realizado uma média para todo o estado, mas a região do semiárido (Grupo 1), com maior área, e a região da zona da mata (Grupos 2 e 3), com maior taxa de precipitação, apresentam regimes diferentes de precipitação.

Quando a região do semiárido inicia o processo de perda de vegetação da caatinga, em meados de maio, diminuindo os resultados dos índices de vegetação, a região da zona da mata está no período chuvoso que perdura até julho. Como a região do semiárido ocupa maior área no estado, a condição dessa área reflete na média final do parâmetro. Por sua vez, a região da zona da mata e litoral possuem as maiores taxas de precipitação, o que aumenta a média final da precipitação na região de estudo.

Outro ponto importante de destacar são as diferenças no comportamento de anos extremos de precipitação. Nesse sentido, o ano mais chuvoso apresenta valores menores de temperatura e valores maiores de índice de vegetação, uma vez que com a maior precipitação, uma quantidade maior de água fica disponível no solo e há um aumento da massa verde. Com isso, atenua-se a energia disponível e, por consequência, a temperatura da superfície.

Portanto, as diferenças dos parâmetros biofísicos ficam evidentes nos anos avaliados em que, no ano mais úmido, os valores dos índices de vegetação e o índice de água foram maiores ao longo do ano, enquanto a temperatura da superfície foi menor. O albedo foi o parâmetro que não mostrou uma diferença de comportamento entre os dois anos em questão.

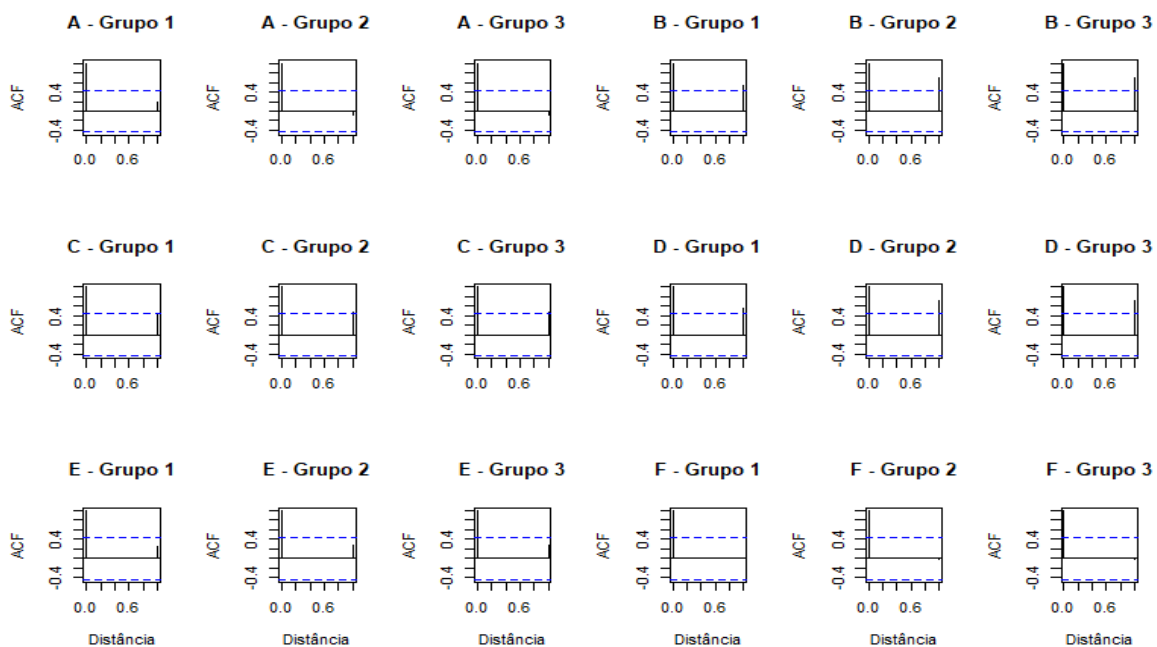
4.2.5 Parâmetros Biofísicos por Zonas Homogêneas de Precipitação Anual

Com o intuito de regionalizar os resultados, visto que, ao considerar todo o estado de Pernambuco, não houve diferenças significativas dos parâmetros biofísicos, realizou-se a análise ao nível dos grupos de precipitação anual. Para tanto, os valores dos parâmetros foram obtidos em cada posto de precipitação e obteve-se uma média anual de todos os componentes do mesmo grupo (Figura 4).

Com os resultados da média dos grupos, ao longo do período de estudo, 2000 até 2019, aplicou-se a análise de tendência temporal de Mann-Kendall, para saber se houve mudanças ao longo dos anos em cada grupo, e uma análise de correlação entre os grupos e o estado de Pernambuco, com o intuito de verificar qual grupo mais contribuía com o resultado do estado.

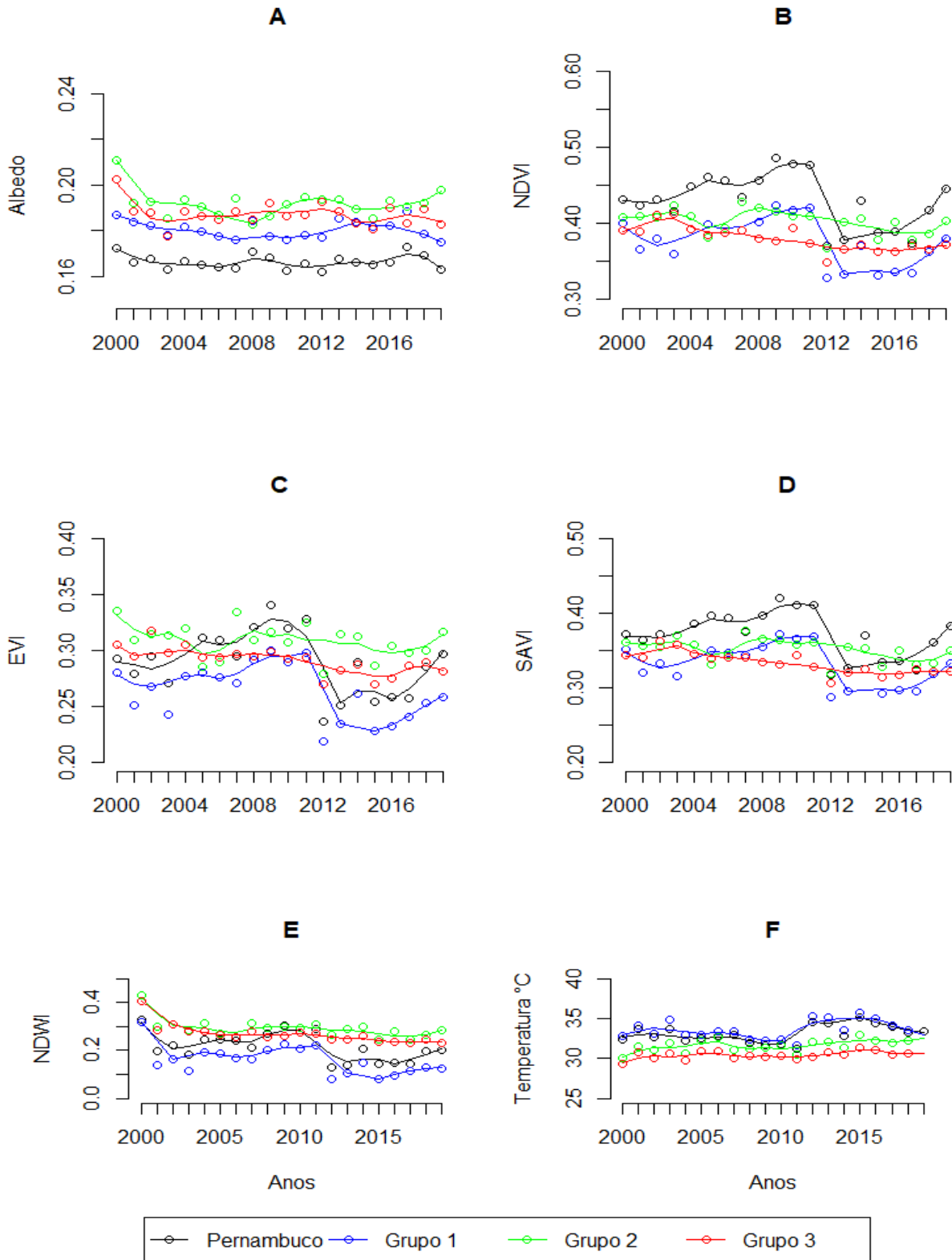
Assim, a Figura 47 apresenta os correlogramas dos parâmetros biofísicos dos grupos. Os resultados apontam que o NDVI e o SAVI possuem autocorrelação e os demais parâmetros não apresentam esse comportamento, independente do grupo. A Figura 48 mostra o comportamento dos parâmetros entre 2000 e 2019.

Figura 47 - Correlograma dos parâmetros biofísicos de Pernambuco e grupos de precipitação (A) Albedo; (B) NDVI; (C) EVI; (D) SAVI; (E) NDWI; (F) Temperatura da Superfície.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Figura 48 – Parâmetros biofísicos de Pernambuco e grupos de precipitação entre 2000 até 2019: (A)Albedo; (B)NDVI; (C)EVI; (D)SAVI; (E)NDWI; (F)Temperatura da Superfície.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Ao observar os comportamentos dos grupos (Figura 48), verificou-se a diferença do comportamento do Grupo 1 em relação aos Grupos 2 e 3. O Grupo 1 possui variabilidade maior de resultados ao longo dos anos, em função do regime de precipitação, se chuvoso ou seco. Os Grupos 2 e 3, por sua vez, apresentam um comportamento mais homogêneo nesse período. Dentre todos, o Grupo 1 apresenta o comportamento mais próximo dos valores de todo o estado, sugerindo que esse grupo é o que mais contribui para o comportamento geral.

A Tabela 12 apresenta a correlação dos grupos de precipitação com os resultados do estado de Pernambuco, o que comprova a relação direta do Grupo 1 no comportamento do estado, visto que todos os parâmetros obtiveram correlações significativas. O Grupo 2 apresentou relação com os resultados do estado, enquanto o Grupo 3 apresentou a menor relação com o estado. Esse comportamento é explicado pelo fato de que a maior parte do estado é coberta pela região de semiárido, como visto na Figura 4.

Tabela 13 – Análise da correlação dos parâmetros biofísicos dos grupos de precipitação anual com os valores médios dos parâmetros de Pernambuco

Parâmetro Biofísico	Estatística	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Albedo	r	0.792**	-0.042 ^{ns}	0.377 ^{ns}
	Método	Pearson	Kendall	Pearson
NDVI	r	0.939**	0.498*	0.421 ^{ns}
	Método	Pearson	Pearson	Pearson
EVI	r	0.942**	0.400 ^{ns}	0.550*
	Método	Pearson	Pearson	Pearson
SAVI	r	0.938**	0.481*	0.422 ^{ns}
	Método	Pearson	Pearson	Pearson
NDWI	r	0.928**	0.453**	0.274 ^{ns}
	Método	Pearson	Kendall	Kendall
Temperatura da Superfície	r	0.937**	0.484**	0.463**
	Método	Kendall	Kendall	Kendall

Códigos de Significância: ** Ao nível de 1%; * Ao nível de 5%; ^{ns} Não significativo

Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

No que tange o comportamento temporal dos parâmetros biofísicos, os índices de vegetação (EVI, NDVI e SAVI) e o índice de água (NDWI) apresentam uma tendência de diminuição, enquanto a temperatura da superfície apresenta tendência a aumentar (Figura 48). Esse comportamento é comum em todos os grupos de precipitação anual, como visto nos resultados do estado. Contudo, o albedo apresenta uma pequena diferença de comportamento entre os grupos, uma vez que o Grupo 2 diverge dos demais e apresenta

tendência de aumento no período, corroborando com os resultados da literatura (MATOS; CANDEIAS; TAVARES JUNIOR, 2013; SANTOS et al., 2017).

Ao observar os resultados do teste de tendência de Mann-Kendall, (Tabela 13) o Grupo 1 obteve resultados não significativos, assim como os resultados do estado (Tabela 6). Por sua vez, o Grupo 2 apresentou tendência significativa de diminuição no SAVI e no NDWI, provavelmente ocasionada pelo período de estiagem que afetou a região (Tabela 5). Enquanto o Grupo 3 apresentou resultados significativos de diminuição dos índices de vegetação (NDVI, EVI e SAVI) e do índice de água (NDWI).

Tabela 14 – Análise tendência temporal de Mann-Kendall dos grupos homogêneos de precipitação

Parâmetro Biofísico	Estatística	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Albedo	Tau (τ)	-0.137 ^{ns}	0.011 ^{ns}	-0.153 ^{ns}
	S-Slope (β)	-0.00012	0.00001	-0.00024
NDVI	Tau (τ)	-0.174 ^{ns}	-0.316 ^{ns}	-0.600**
	S-Slope (β)	-0.002	-0.001	-0.002
EVI	Tau (τ)	-0.200 ^{ns}	-0.211 ^{ns}	-0.579**
	S-Slope (β)	-0.001	-0.001	-0.001
SAVI	Tau (τ)	-0.179 ^{ns}	-0.379*	-0.632**
	S-Slope (β)	-0.002	-0.001	-0.002
NDWI	Tau (τ)	-0.274 ^{ns}	-0.400*	-0.726**
	S-Slope (β)	-0.004	-0.002	-0.003
Temperatura da Superfície	Tau (τ)	0.063 ^{ns}	0.221 ^{ns}	0.137 ^{ns}
	S-Slope (β)	0.018	0.053	0.028

Códigos de Significância: ** Ao nível de 1%; * Ao nível de 5%; ^{ns} Não significativo

Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

O Grupo 3 apresentou tendência de diminuição dos parâmetros EVI, NDVI, SAVI e NDWI na ordem de 0,04 ao longo dos 20 anos, visto que a declividade média deles foi de -0,002. Esse comportamento diverge dos resultados encontrados nos mapas dos parâmetros biofísicos, em que não se percebe uma alteração desses índices na região do litoral e zona da mata (Figura 9, 11, 13 e 15). Isso se deve ao fato de que foram obtidos os dados dos pixels dos postos, os quais se concentraram em cidades da Região Metropolitana do Recife. Portanto, durante esse período de avaliação, as áreas próximas aos postos provavelmente tiveram a vegetação retirada devido ao crescimento das cidades.

Com a retirada da cobertura vegetal, essas regiões perderam os serviços ecossistêmicos prestados, o que pode desregular as condições de temperatura, fornecimento de água e alimentos (GOMES et al., 2019) na localidade. Além disso, a cobertura vegetal fornece

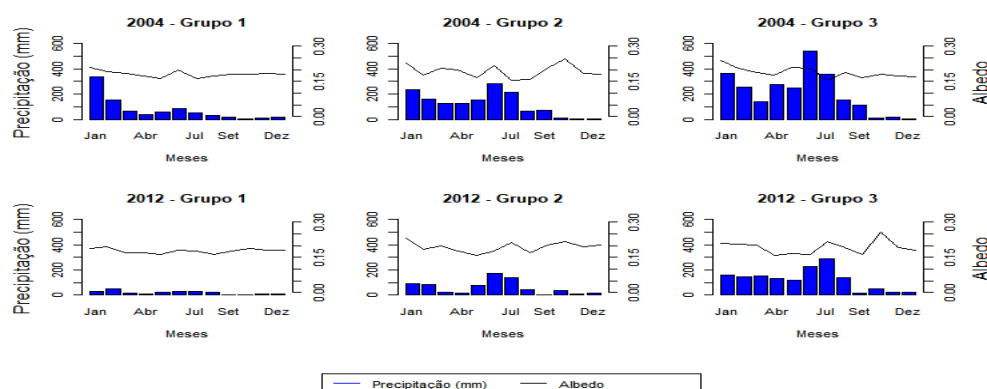
proteção aos solos, reduzindo a exposição das suas partículas às ações do vento, da chuva e do escoamento, podendo ocasionar em aumento de inundações nas regiões com maior acúmulo de sedimentos.

Contudo, a diminuição da vegetação, observada nos índices de vegetação, e o conteúdo de água no solo e na vegetação, NDWI, não ocasionou em incremento suficiente para aumentar de maneira significativa a temperatura da superfície. Provavelmente, esse comportamento é devido ao fato de o ar possuir uma quantidade maior de umidade na região, em função da proximidade com o oceano, que possui grande capacidade térmica de atenuar as mudanças diárias de temperatura (REBOITA; AMBRIZZI; PORFÍRIO DA ROCHA, 2012)

4.2.6 Sazonalidade dos Parâmetros Biofísicos por Zonas Homogêneas de Precipitação Anual nos Anos Extremos

Com o intuito de compreender a sazonalidade dos parâmetros biofísicos nos grupos de precipitação e de verificar as semelhanças e as divergências entre eles nos anos de precipitação extrema, realizou-se a média mensal dos postos de cada zona. Os anos escolhidos foram 2004, como mais úmido, e 2012, como mais seco, observado na Tabela 5. A Figura 49 apresenta os resultados da sazonalidade do albedo nos grupos.

Figura 49 – Média mensal do albedo da superfície e precipitação nos grupos homogêneos nos anos extremos: 2004 (muito úmido) e 2012 (muito seco).

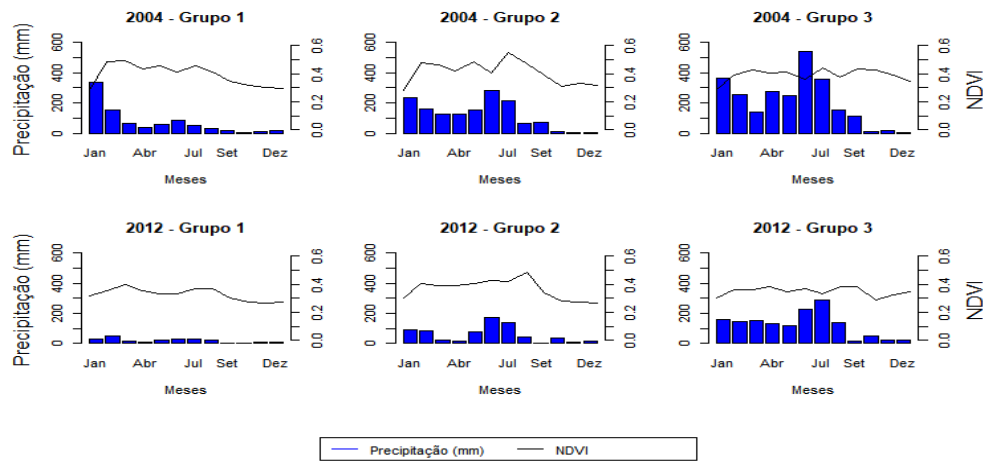


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Foi verificada uma diferença nos comportamentos dos grupos, com os resultados do Grupo 1 (semiárido) apresentando pequenas variações ao longo do ano e dos Grupos 2 e 3 com maior variabilidade ao longo do mesmo ano.

A Figura 50 apresenta o comportamento dos grupos para o NDVI e percebe-se que os grupos possuem variação maior durante o ano de acordo com a precipitação. Contudo, é interessante relatar que nos Grupos 2 e 3, nos meses de maior precipitação, como em junho e julho, há uma ligeira redução dos valores dos parâmetros biofísicos.

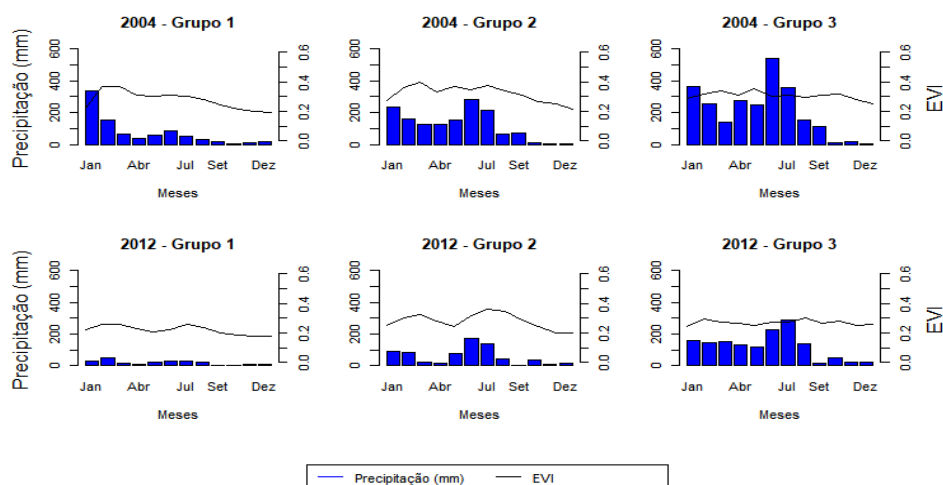
Figura 50 – Média mensal do NDVI e precipitação dos grupos homogêneos nos anos extremos: 2004 (muito úmido) e 2012 (muito seco).



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Ao analisar os resultados do EVI (Figura 51), percebe-se que no ano mais úmido (2004), os resultados são mais variáveis, com exceção do Grupo 3, no qual os valores se mantêm próximos de 0,3. Enquanto no ano mais seco (2012), os resultados se mantêm mais constantes, à exceção do Grupo 2 que continua apresentando variabilidade dos resultados.

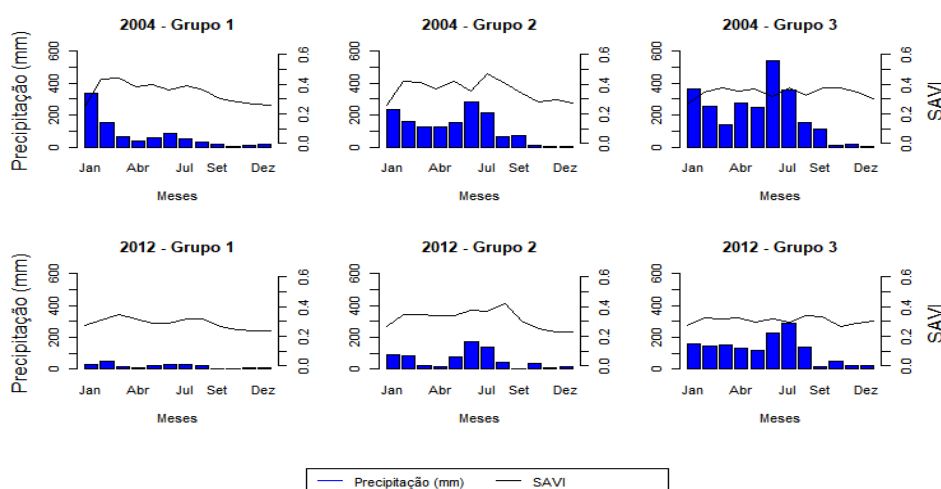
Figura 51 – Média mensal do EVI e precipitação nos grupos homogêneos nos anos extremos: 2004 (muito úmido) e 2012 (muito seco).



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A sazonalidade do SAVI também manteve as características dos outros índices de vegetação nos anos extremos de precipitação (Figura 52), em especial, o comportamento do NDVI, uma vez que os meses de maior precipitação corresponderam a uma leve redução do parâmetro nos Grupos 2 e 3, em especial junho e julho.

Figura 52 – Média mensal do SAVI e precipitação nos grupos homogêneo nos anos extremos: 2004 (muito úmido) e 2012 (muito seco).

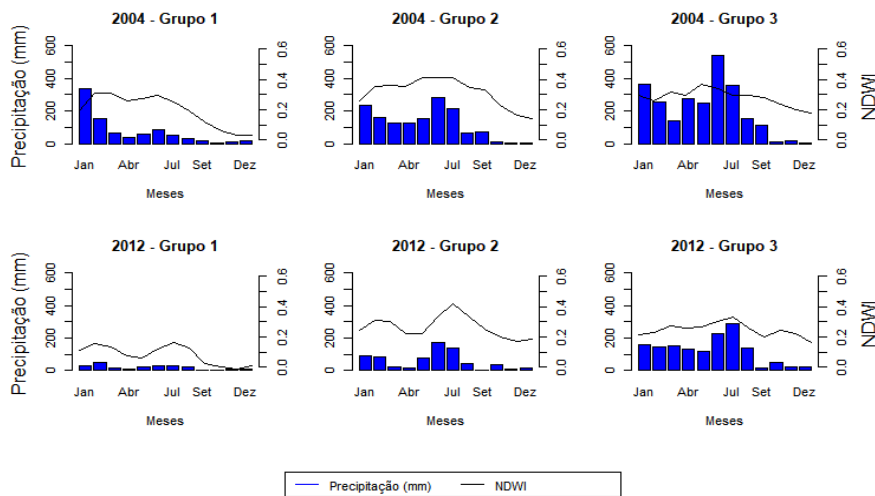


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

É provável que o comportamento observado no NDVI e no SAVI, para o Grupo 3, esteja relacionado com o aumento de corpos d'água e com a camada de solo saturada em função das taxas de precipitação. Antico (2012) relata que o uso do NDVI em áreas úmidas não é usual porque o ciclo sazonal é interrompido por valores negativos de NDVI devido ao excesso de água. Isso acontece porque a água tem alta absorção no espectro visível e na maior parte da energia do infravermelho (ZOFFOLI *et al.*, 2008), ocasionando na redução dos índices.

A Figura 53 apresenta a média mensal NDWI nos três grupos formados, que apresenta um comportamento semelhante aos índices de vegetação (EVI, NDVI e SAVI), com o Grupo 1 mais dependente do regime de precipitação anual, o Grupo 2 mais heterogêneo e o Grupo 3 mais homogêneo ao longo do ano. Contudo, há um bom ajuste da precipitação ao parâmetro biofísico em questão em todos os grupos.

Figura 53 – Média mensal do NDWI e precipitação nos grupos homogêneo nos anos extremos: 2004 (muito úmido) e 2012 (muito seco).



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

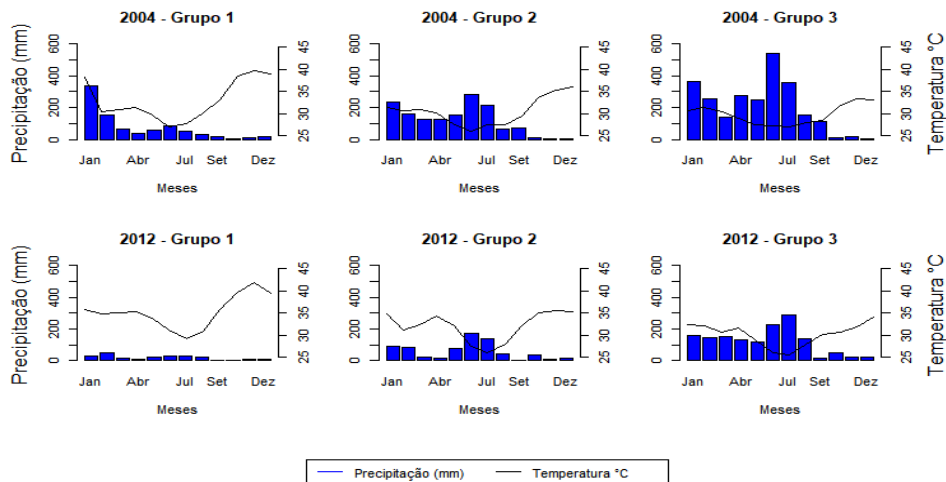
Ao observar os índices de vegetação (EVI, NDVI e SAVI) e o índice de água (NDWI), o comportamento do Grupo 1 apresentou maior dependência do regime de precipitação em função da área semiárida. Dessa forma, a vegetação tende a responder mais rapidamente aos eventos de precipitação. Além disso, o ano mais seco apresentou variação menor, diferente de um ano mais úmido.

O Grupo 2 apresentou variabilidade mais acentuada visto que é uma região de transição. Dessa forma, parte da vegetação de alguns postos apresentou características similares ao semiárido, respondendo melhor aos eventos de chuva, e outras áreas apresentaram características de zona da mata e litoral, com vegetação mais densa.

Já o Grupo 3 apresentou comportamento constante, independente do regime de chuva anual, visto que a precipitação ao ano é alta (1800mm), assim, a vegetação apresenta uma menor dependência aos eventos de chuva. Algo semelhante foi identificado por Souza et al. (2014), que encontram uma variação menor do NDVI entre o período chuvoso e de estiagem, o que atribuíram à vegetação da região, composta por árvores de grande porte, permitindo manter o vigor durante a maior parte do ano.

Com relação aos gráficos da média da temperatura da superfície nos grupos em anos extremos (Figura 54), destaca-se o comportamento inverso aos índices de vegetação. O início e o final do ano apresentaram as maiores temperaturas e o meio do ano com menor temperatura da superfície em todos os grupos.

Figura 54 – Média mensal da temperatura da superfície e precipitação nos grupos homogêneo nos anos extremos: 2004 (muito úmido) e 2012 (muito seco).



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

O comportamento mensal desse parâmetro não se modifica com os regimes diferentes de precipitação. Contudo, é possível perceber que, no ano mais seco (2012), os valores da temperatura permanecem altos durante um período de tempo maior, visto que a declividade do gráfico se torna maior nesse ano para o período de maio até julho, se comparado ao ano mais úmido (2004) em todos os grupos.

A Tabela 14 apresenta a correlação dos parâmetros com a precipitação e os resultados confirmam os comportamentos esperados, como uma correlação positiva da precipitação com os índices de vegetação e com índice de água e correlação inversa com a temperatura. Em relação ao albedo, também há uma relação positiva, provavelmente em função do aumento de nuvens com maior precipitação.

Tabela 15 – Correlação da média mensal dos parâmetros biofísicos com a precipitação mensal nos grupos homogêneos de precipitação

Parâmetro Biofísico	Estatística	2004			2012		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Albedo	r	0.242 ^{ns}	0.032 ^{ns}	0.478 ^{ns}	0.224 ^{ns}	-0.062 ^{ns}	0.061 ^{ns}
	Método	Kendall	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson
EVI	r	0.515*	0.569 ^{ns}	0.236 ^{ns}	0.675*	0.511 ^{ns}	0.245 ^{ns}
	Método	Kendall	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson
NDVI	r	0.412 ^{ns}	0.355 ^{ns}	-0.239 ^{ns}	0.512 ^{ns}	0.468 ^{ns}	0.129 ^{ns}
	Método	Kendall	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson
SAVI	r	0.424 ^{ns}	0.373 ^{ns}	-0.255 ^{ns}	0.515 ^{ns}	0.461 ^{ns}	0.084 ^{ns}
	Método	Kendall	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson
NDWI	r	0.636**	0.699*	0.710**	0.829**	0.688*	0.842**
	Método	Kendall	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson
Temperatura da Superfície	r	-0.424 ^{ns}	-0.701*	-0.662*	-0.567 ^{ns}	-0.708**	-0.705*
	Método	Kendall	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson

Códigos de Significância: ** Ao nível de 1%; * Ao nível de 5%; ^{ns} Não significativo

Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

No entanto, a maioria das correlações não foi significativa entre os parâmetros e a precipitação (Tabela 14) para todos os grupos e anos de extremos, à exceção do índice de água (NDWI). Detalhando melhor, o Grupo 1 possui também correlação moderada no EVI, nos anos extremos. Para os Grupos 2 e 3, a temperatura da superfície é outro parâmetro que obteve correlação significativa e forte.

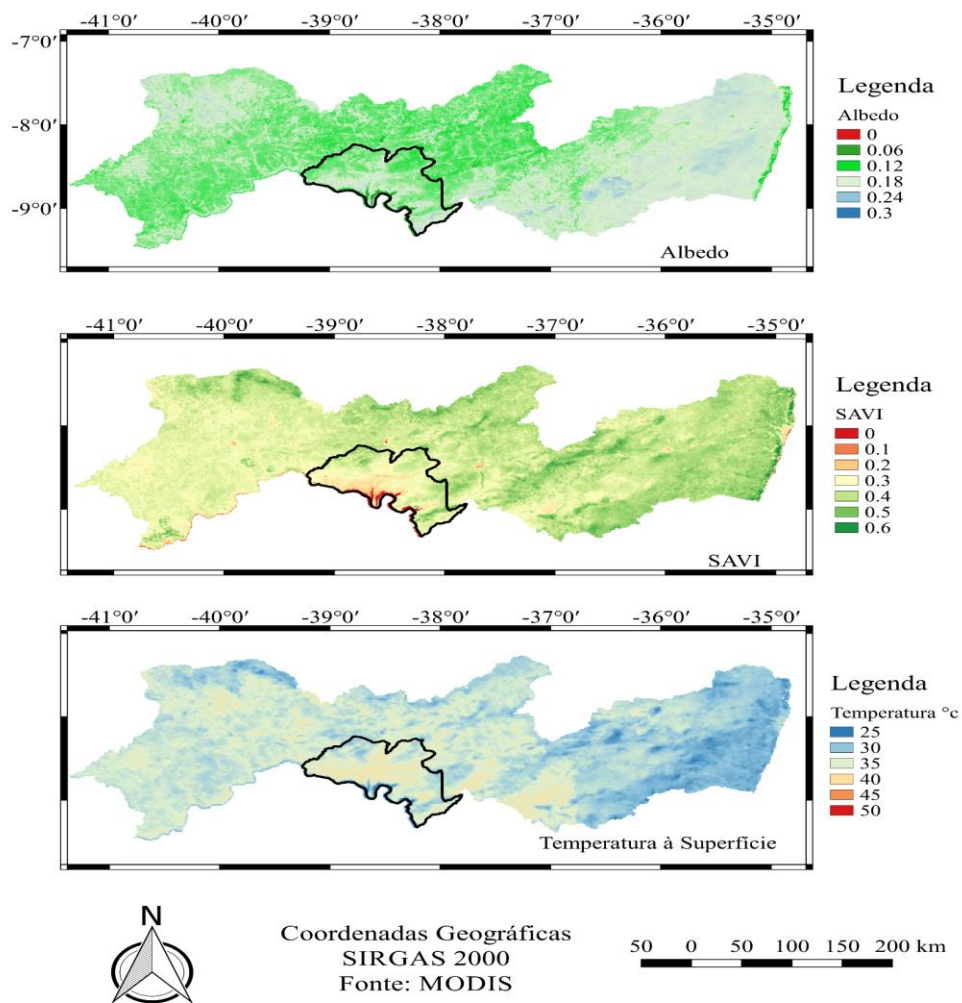
Por apresentar uma correlação significativa de moderada à forte para todos os grupos e nos dois regimes de precipitação, é possível utilizar o NDWI como variável de entrada na estimativa da ocorrência da precipitação em qualquer região do estado de Pernambuco. Dessa forma, ele poderia ser usado como uma ferramenta no monitoramento da precipitação no estado de Pernambuco, além de permitir a compreensão das condições hídricas da vegetação e superfície (ALBUQUERQUE et al., 2014; RIBEIRO et al., 2015) e auxiliar a gestão hídrica do estado.

4.3 Estudo de uma Área Crítica

Ao observar o comportamento dos parâmetros biofísicos no estado de Pernambuco, verificou-se uma alteração da cobertura da superfície em função de diversas condições, em especial precipitação. Contudo, a região localizada entre os municípios de Belém de São

Francisco, Floresta, Petrolândia, Tacaratu, Jatobá, Carnaubeira da Penha e Itacuruba apresenta uma condição constante, ao longo do tempo avaliado, e crítica (Figura 55). A Figura 55 apresenta os mapas dos parâmetros biofísicos do Estado de Pernambuco no período de 2000 até 2019. Em geral, essa região crítica apresenta os altos valores de albedo ($>0,18$), baixos índices de vegetação ($<0,20$), exemplificado pelo SAVI, e altas temperatura da superfície classificadas como ($>40^{\circ}\text{C}$).

Figura 55 – Localização da Área Crítica em Pernambuco

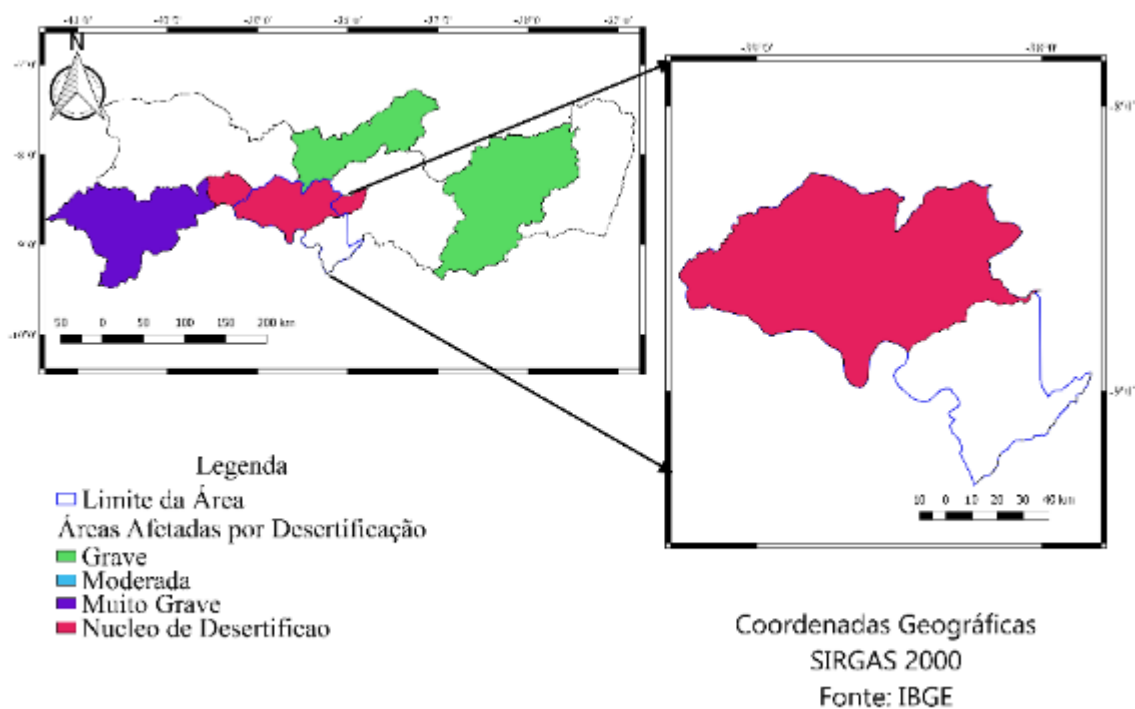


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Essa região está localizada na mesorregião do Sertão do São Francisco de Pernambucano, semiárido Pernambucano, dentro do Bioma de Caatinga. Para melhor compreender o comportamento dessa região, esse estudo aplicou técnicas de geotecnologias na região a partir da base de dados do IBGE e MAPBIOMAS.

Ao observar os dados de áreas afetadas por desertificação no Brasil, verifica-se que uma parte significativa da região avaliada está inserida no núcleo de desertificação de Cabrobó (Figura 56). Os núcleos de desertificação são o efeito máximo do processo de degradação ambiental e, portanto, são os espaços mais problemáticos e potenciais à desertificação (de SOUSA SILVA, 2019).

Figura 56 – Áreas Afetadas por Desertificação em Pernambuco e na área crítica.



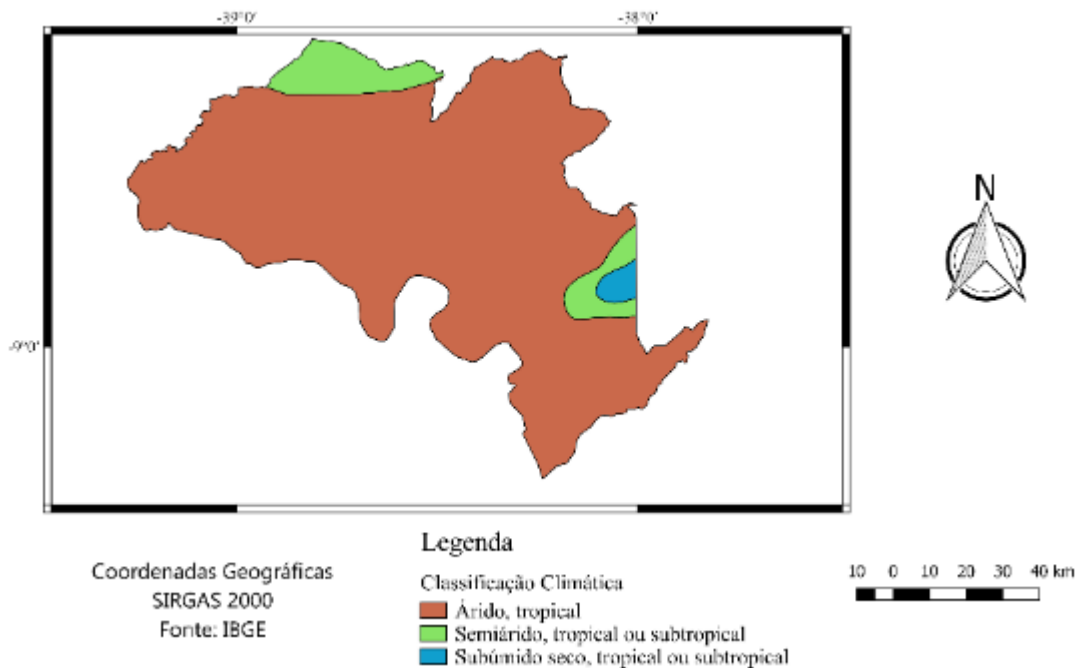
Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Entende-se, de maneira geral, que a desertificação é acentuada em regiões que apresentam um clima seco, uma vez que a seca e a desertificação são fenômenos interligados (LOULLI; HADJIMITSIS, 2018). Esse fenômeno pode ser entendido como uma sequência de modificações de degradação do solo, da vegetação e do regime hídrico, ocasionadas por variações climáticas e ações antrópicas, em conjunto ou separadas, que conduzem à deterioração biológica do ecossistema da região (SOARES; MOTA FILHO; NÓBREGA, 2011).

Para detalhar melhor esses aspectos, inicialmente, se observa que na área avaliada predomina a classificação climática Árida (Figura 57) com temperatura média variando de

23 à 28 °C; precipitação entre 250 a 550 mm e Índice de Aridez de -66 a -100. Portanto, quanto ao clima, a região apresenta uma forte propensão aos processos de desertificação.

Figura 57 – Classificação Climática da Área Crítica.

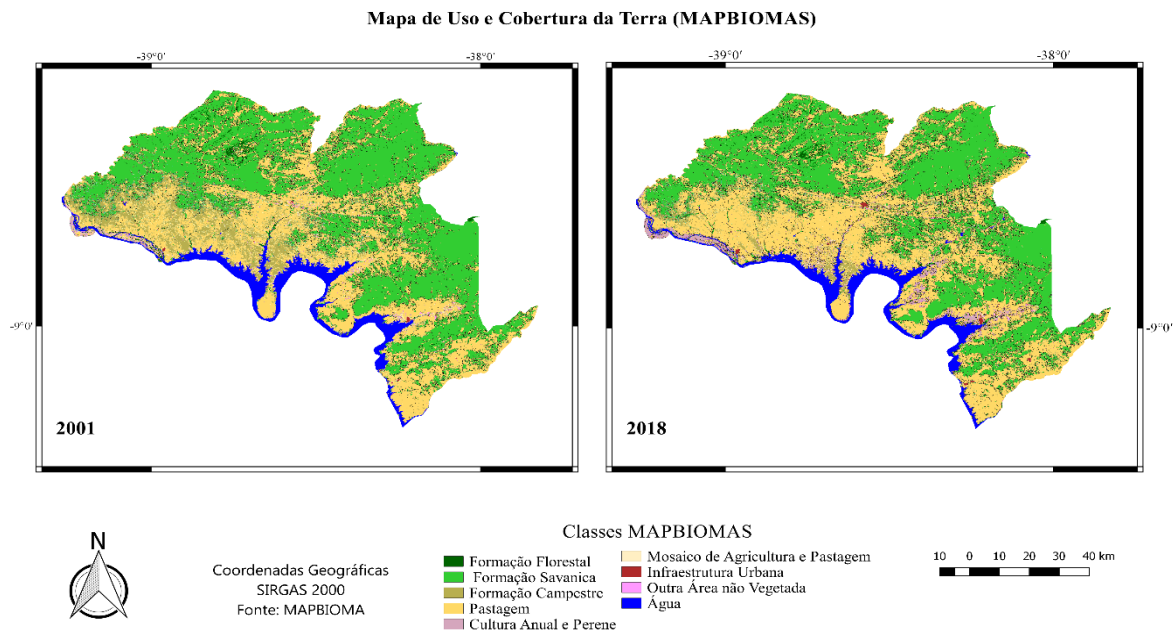


Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Quanto ao núcleo de desertificação de Cabrobó, Silva (2014) destaca que causas naturais contribuem com o fenômeno como a Aridez e a Precipitação Irregular. Tal foi destacado por Lucena, Nóbrega e Wanderley (2017). As causas antrópicas são o sobre pastoreio, desmatamento e salinização do solo (projetos de irrigação), ocasionado por manejo inadequado. Em função do mau manejo, tanto das áreas quanto das técnicas de irrigação, extensas áreas foram inutilizadas para o cultivo devido à redução da fertilidade e acúmulo de sais nas camadas superficiais dos solos (SILVA; SILVA, 2015).

Analisando as classes de cobertura da terra desenvolvidas pelo projeto MAPBIOMAS, nota-se que a região mais crítica, nas proximidades do Rio São Francisco, possui áreas cobertas por pastagem e formação campestre (Figura 58), com pouca alteração da cobertura nas duas décadas desse século XXI. Essa formação apresenta uma cobertura de vegetação esparsa que pode propiciar a ocorrência de processos erosivos e acentuar o processo de desertificação.

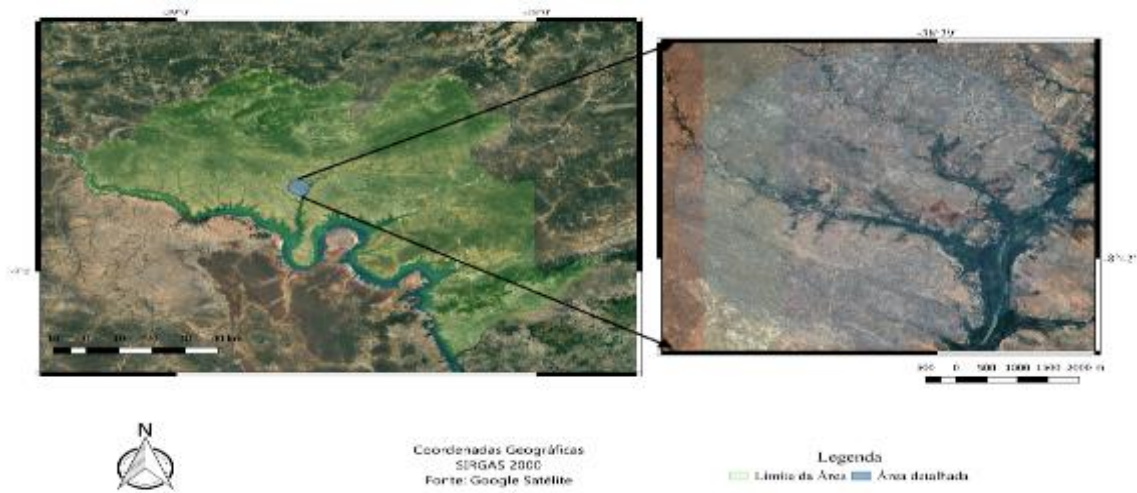
Figura 58 – Classes de Uso e Cobertura da Terra pelo MAPBIOMAS nos anos de 2001 e 2018.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

Os núcleos de desertificação, como dito anteriormente, seriam o último estágio desse processo de transformação e são caracterizados por extensas áreas desnudas, com ou sem a presença da cobertura vegetal rasteira, e sinais claros de erosão do solo (PEREZ-MARIN et al., 2012). Nesse sentido, imagens com alta resolução espacial permitiram detalhar essas características do núcleo de desertificação por toda a área (Figura 59).

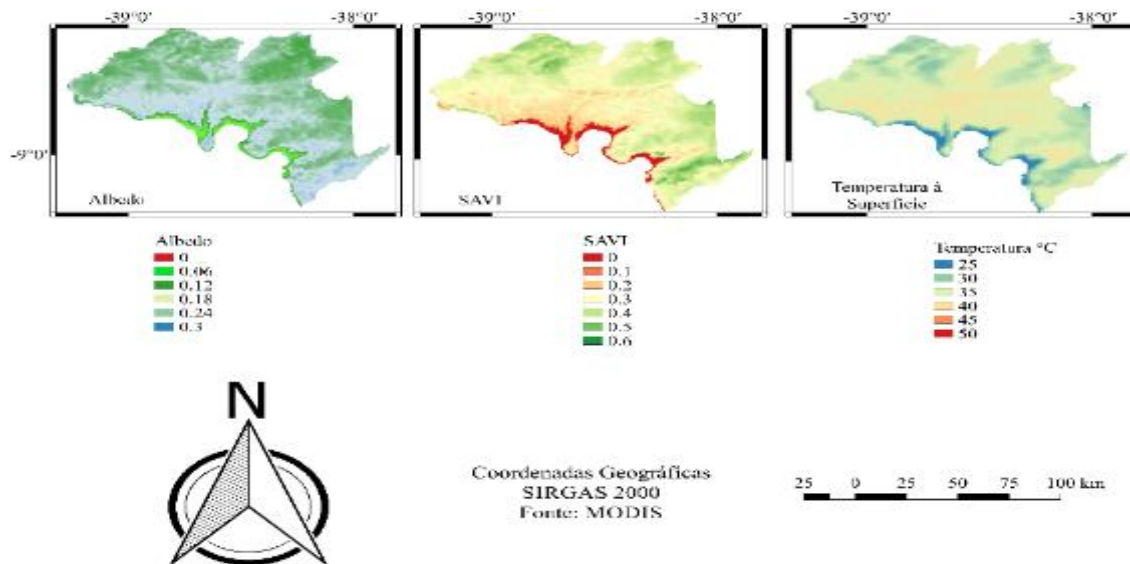
Figura 59 – Imagens de alta resolução espacial para detalhamento da cobertura do solo.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

A Figura 60 apresenta um detalhamento dos parâmetros biofísicos da região de estudo e pelo que se verifica que as áreas mais afetadas estão nas proximidades do Rio São Francisco. As áreas mais críticas correspondem às cores azuladas no mapa do albedo, cores alaranjadas no mapa do SAVI e da Temperatura da superfície.

Figura 60 – Detalhamento do Albedo da superfície, SAVI e Temperatura da superfície para a região crítica.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020)

É perceptível que as áreas com as condições mais críticas dos parâmetros biofísicos (Figura 60) apresentam as características típicas do núcleo de desertificação: solo desnudo ou vegetação esparsa. Com base nessas respostas, a tendência é que essas áreas apresentem vegetação muito esparsa, que deixa o solo mais exposto. Portanto, o albedo e a temperatura da superfície tendem a ser maiores, com índices de vegetação menores.

É importante destacar que as áreas inseridas no núcleo de desertificação (Figura 56) de fato possuem as condições mais problemáticas em toda a área avaliada. Contudo, é possível verificar que algumas regiões a sudeste, fora da área do núcleo de desertificação, também apresentam respostas dos parâmetros biofísicos semelhantes às áreas mais críticas. Isso provavelmente indica um deslocamento do núcleo de desertificação nessa direção, o que demanda atualização dos dados de áreas susceptíveis aos processos de desertificação e atenção especial para conter a expansão do núcleo de desertificação do semiárido dados os graves problemas de ordem social, econômica e ambiental que podem gerar.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pernambuco possui três regiões homogêneas de precipitação, uma no semiárido, uma no litoral e outra de transição. A região do Grupo 1, de semiárido, é a de maior extensão na região e apresentou período de estiagem recente entre os anos de 2012 a 2017. Durante o período de 2000 a 2019, o ano de 2004 foi o mais úmido nas três regiões, e o ano de 2012 foi o mais seco, conforme análise do Índice de Anomalia de Chuva.

O processamento digital em nuvem é uma importante ferramenta para análise de grandes quantidades de imagens e de dados com grande velocidade e precisão. O uso da redução da imagem por média apresenta uma resposta mais adequada à situação da cobertura do solo.

É sabido que durante esse período de avaliação ocorreram diversas mudanças da cobertura do solo, mas, considerando apenas o nível estatístico e a resolução espacial do MODIS, não ocorreram, para o período investigado, alterações significativas na cobertura do solo ou supressão da vegetação que provocasse mudanças nos parâmetros biofísicos, por consequência, alteração da dinâmica ambiental do estado.

Por outro lado, percebe-se que a estiagem na região semiárida provoca significativas alterações nos parâmetros biofísicos, as quais podem vir a se tornar mais problemáticas com a confirmação das projeções de mudanças climáticas para a região Nordeste do Brasil. Por outro lado, ao se analisar o comportamento nas zonas homogêneas de precipitação anual, percebe-se a tendência de redução da vegetação ao longo dos últimos 20 anos para a região próxima do litoral do estado.

Nos anos com precipitação extrema, há diferença no nível de respostas dos parâmetros biofísicos, contudo o comportamento é semelhante. Para monitoramento da precipitação no estado de Pernambuco, o parâmetro biofísico mais adequado é o índice NDWI, enquanto que para o grupo do semiárido, além do índice de água, pode-se utilizar o índice EVI. Para o grupo da Zona da Mata e litoral, por sua vez, recomenda-se a Temperatura da superfície.

A região do núcleo de desertificação de Cabrobó está modificando sua configuração espacial, demonstrando um deslocamento dessa região à sudeste. Dessa forma, é interessante atualizar as regiões afetadas por processos de desertificação e adotar políticas públicas para combate dessa problemática.

Recomenda-se a realização de análises das mudanças ambientais oriundas de sensores com melhores resoluções espaciais para diferenciar melhor as mudanças de cobertura do solo. Além disso, sugere-se aplicar outras técnicas de processamento de imagem, tais como teste de tendência temporal com índices de vegetação em nível do pixel e análise de vetor de mudança, validando os resultados com dados de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, E. M. DE et al. Análise do Comportamento do Ndvi E Ndwi Sob Diferentes Intensidades Pluviométricas No Município De Sousa-Pb. **Revista Estudos Geoambientais – online**, v. 01, n. 01, p. 1–11, 2014. Disponível em: <https://www.periodicos.ufpb.br/>
- ALVARES, C. A. et al. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALENCAR, M. L. S. DE; BARBOSA, M. P.; SOUSA, R. F. de. Efeitos do El Niño de 1997/1998 na produção agropecuária na bacia do Rio Sucuru - Cariri Paraibano. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 8, n. 24, p. 15-21, 2007. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/download/15553/8802/>. Acesso em: 20 dez. 2019.
- 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. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)). Acesso em: 15 out. 2019.
- ALLEN, R.G. et al. SEBAL - **Surface Energy Balance Algorithms for Land**. Advanced Training and Users’ Manual, Version 1.0. University of Idaho, EUA. 97 p. 2002.
- ALVES, T. L. B. et al. Comportamento Sazonal Do Albedo E Dos Índices De Vegetação Na Bacia Hidrográfica Do Alto Curso Do Rio Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 5, p. 1015-1027, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233416>. Acesso em: 22 jan. 2020.
- ANDREOLI, R. V. et al. A influência da temperatura da superfície do mar dos Oceanos Pacífico e Atlântico na variabilidade de precipitação em Fortaleza. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n. 2, p. 113-122, 2004. Disponível em: http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/walmeida/2004/04.08.13.49/doc/Andreoli_A%20influen%20cia%20da%20temperatura%20da%20superfície%20do%20mar . Acesso em: 03 dez. 2019.
- ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. A importância relativa do Atlântico tropical sul e Pacífico leste na variabilidade de precipitação do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 1, p. 63-74, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862007000100007>. Acesso em: 15 dez. 2019.
- ANTICO, A. Independent component analysis of MODIS-NDVI data in a large South American wetland. **Remote Sensing Letters**, v. 3, n. 5, p. 383–392, 7 set. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.603376>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- ARAÚJO, A. L. et al. Análise das Mudanças de Parâmetros Biofísicos Sobre o Nordeste Brasileiro de 2002 a 2011 com Dados Modis. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33,

n. 4, p. 589-599, 2018. Disponível em: 10.1590/0102-7786334002. Acesso em: 26 jan. 2020.

ARAÚJO, L. E.; MORAES NETO, J. M.; SOUSA, F. A. S. Classificação da precipitação anual e da quadra chuvosa da bacia do rio Paraíba utilizando índice de Anomalia de Chuva (IAC). **Ambi-Agua**, v. 4, n. 3, p. 93-110, 2009. Disponível em: 10.4136/ambi-agua.105. Acesso em: 14 nov. 2020.

BATISTA, P. H. D., ALMEIDA, G. L. P., SILVA, J. L. B., PANDORFI, H., SILVA, M. V., SILVA, R. A. B., JUNIOR, J. J. F. Short-term grazing and its impacts on soil and pasture degradation. **DYNA: Revista de la Facultad de Minas**, vol. 87 n. 213, p. 123-128, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v87n213.81853>. Acesso em: 16 ago. 2020.

BLASCHKE, T.; KUX, H. **Sensoriamento remoto e SIG avançados**: novos sistemas sensores, métodos inovadores. 2ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BORGES, E. F.; SANO, E. E. Caracterização Fenológica Da Cobertura Vegetal Do Oeste Da Bahia A Partir De Séries Temporais de EVI Do Sensor Modis. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 6, p. 1265–1280, 2014. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44712>. Acesso em: 06 fev. 2020.

BRASIL. **Política Nacional do Meio Ambiente**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/CCIVIL/LEIS/L6938.HTM>

BRASIL. **RESOLUÇÃO N° 107/2017, DE 25 DE JUNHO DE 2017. Delimitação do semiárido**. Recife, PE, 2017. Disponível em: <http://sudene.gov.br/images/2017/arquivos/Resolucao-107-2017.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2019.

BRITO, S. S. B. et al. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 2, p. 517–529, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.5225>. Acesso em: 16 dez. 2019.

BRUNET-MORET, Y. **Homogénéisation des précipitations**. **Cahiers ORSTOM**, série Hydrologie. v. 16, p. 3–4, 1979. Disponível em: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_4/hydrologie/14958.pdf. Acesso em: 22 mar. 2020.

CALEGARE, M.G.A.; DA SILVA JÚNIOR, N. Progresso, desenvolvimento sustentável e abordagens diversas de desenvolvimento: uma sucinta revisão de literatura. **Desenvolvimento e Meio ambiente**, v. 24, p. 39-56, jul./dez. 2011. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/view/21528/17079>. Acesso em: 22 mar. 2020.

CAMPOS, J. de O.; MARINHO, H.; CHAVES, L. Tendências e Variabilidades nas Séries Históricas de Precipitação Mensal e Anual no Bioma Cerrado no Período 1977-2010. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 157–169, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-7786351019>. Acesso em: 08 abril. 2020.

CÂNDIDO, D. H.; NUNES L. H. Influência da Orografia na Precipitação da Área Entre o Vale do Rio Tietê e a Serra da Mantiqueira. **Revista GEOUSP - Espaço e Tempo**, São Paulo, v. 24, n. 24, p. 08-27, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2008.74094>. Acesso em: 08 dez. 2019.

COSTA, A de S. et al. Temporal space variability for precipitation in the state of Pernambuco. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 7, n. 1, p. 1-7, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/jhrs/article/view/22767>. Acesso em: 14 nov. 2019.

CUNHA, A. P. M. et al. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 214–215, p. 494–505, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.010>. Acesso em: 15 jan. 2020.

DE GROOT, R.S., BLIGNAUT, J., VAN DER PLOEG, S., ARONSON, J., ELMQVIST, T. and FARLEY, J., Benefits of Investing in Ecosystem Restoration. **Conservation Biology**, vol. 7, p. 1286-1293, 2013. Disponível em: 10.1111/cobi.12158 Acesso em: 08 dez. 2019.

DIDAN, Kamel et al. **MODIS vegetation index user's guide (MOD13 series)**. University of Arizona: Vegetation Index and Phenology Lab, 2015.d

DOURADO, C. da S.; OLIVEIRA, S. R. de M.; AVILA, A. M. H. Análise de zonas homogêneas em séries temporais de precipitação no Estado da Bahia. **Bragantia**, v. 72, n. 2, p. 192-198, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052013000200012>. Acesso em: 14 nov. 2019.

DULLEY, R. D. Noção de natureza, ambiente, meio ambiente, recursos ambientais e recursos naturais. **Agricultura em São Paulo**, v. 51, n. 2, p. 15-26, 2004. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/publicacoes/pdf/asp-2-04-2.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2020.

EASTMAN, J. R. et al. Seasonal trend analysis of image time series. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 10, p. 2721–2726, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160902755338>. Acesso em: 20 jan. 2020.

ECKERT, S. et al. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia. **Journal of Arid Environments**, v. 113, p. 16–28, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.09.001>. Acesso em: 18 jan. 2020.

ELACHI, C. **Spaceborne radar remote sensing: Applications and techniques**. Nova Iorque: IEEE Press, 1987

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 2ª Edição. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

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, 2004, Puerto Iguazú. **Anais...Puerto Iguazú: CACIER**, 2004. v. 1. p. 1-1.

FREITAS, M. A. S. Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semiáridas. **Revista Tecnologia**, v. suplemento, p. 84-95, 2005. Disponível em: <https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/1175>. Acesso em: 24 mar. 2020.

GAO, B. C. NDWI: A Normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257 – 266, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3). Acesso em: 10 jan. 2020.

GOLDBLATT, R.; RIVERA BALLESTEROS, A.; BURNEY, J. High spatial resolution visual band imagery outperforms medium resolution spectral imagery for ecosystem assessment in the semi-arid Brazilian sertão. **Remote Sensing**, v. 9, n. 12, p. 1336, 2017. Disponível em: 10.3390/rs9121336. Acesso em: 13 jan. 2020.

GOMES, G. C. et al. Environmental and Ecosystem Services, Tree Diversity and Knowledge of Family Farmers. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.031416>. Acesso em: 13 jan. 2020.

GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>. Acesso em: 04 fev. 2020.

GRÊT-REGAMEY, A.; WEIBEL, B.; BAGSTAD, K. J.; FERRARI, M.; GENELETTI, D. KLUG, H.; SCHIRPKE, U.; TAPPEINER, U. On the effects of scale for ecosystem services mapping. **Plos One**, vol. 9, n. 12, dez., p. 1-17, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112601>. Acesso em: 14 jan. 2020.

HAIR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. Tradução Adonai Schlup Sant'Anna, 6ª Edição.[SI] Bookman Editora, 2009.

HAMED, K. H.; RAO, A. R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. **Journal of hydrology**, v. 204, n. 1-4, p. 182-196, 1998. Disponível em: 10.1016/S0022-1694(97)00125-X. Acesso em: 27 mar. 2020.

HIEZ, G. et al. L'homogénéité des données pluviométriques. **Cahiers ORSTOM**, série Hydrologie, v. 14, n. 02, p. 29-173, 1977. Disponível em: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_4/hydrologie/14940.pdf. Acesso em: 22 mar. 2020.

HOUSPANOSSIAN, J. et al. Surface albedo raise in the South American Chaco: Combined effects of deforestation and agricultural changes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 118–127, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.015>. Acesso em: 18 jan. 2020.

HU, G.; JIA, L. Monitoring of Evapotranspiration in a Semi-Arid Inland River Basin by Combining Microwave and Optical Remote Sensing Observations. **Remote Sensing**, v. 7, n. 3, p. 3056–3087, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs70303056>. Acesso em: 02 mar. 2020.

HUETE, A. R.; et al. A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, n. 59, p. 440 – 451, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5). Acesso em: 24 jan. 2020.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988. Disponível em: [https://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-](https://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-). Acesso em: 23 jan. 2020.

JUSTICE, C. O. et al. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 3-15, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00084-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00084-6). Acesso em: 20 jan. 2020.

KALACSKA, M. et al. A New Multi-Temporal Forest Cover Classification for the Xingu River Basin. **Brazil. Data**, v. 4, n. 3, p. 114, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/data4030114>. Acesso em: 10 fev. 2020.

KENDALL, M. G., **Rank Correlation Methods**, 4a ed., Londres: Charles Griffin, 1975.

LACERDA, F. F. **Tendências De Temperatura E Precipitação E Cenários De Mudanças Climáticas De Longo Prazo No Nordeste Do Brasil E Em Ilhas Oceânicas**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

LE CLEC'H, S. et al. Mapping multiple ecosystem services indicators: Toward an objective-oriented approach. **Ecological indicators**, v. 69, p. 508-521, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.05.021>. Acesso em: 15 jan. 2020.

LELIS, T. A et al. Impactos causados pelas mudanças climáticas nos processos erosivos de uma bacia hidrográfica: Simulação de cenários. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**: v. 6, n. 2, p. 282-294, 2011. Disponível em: [10.4136/ambi-agua.200](http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.200). Acesso em: 12 fev. 2020.

LEMOS FILHO, L. C. de A.; FERREIRA, L. L. N.; LYRA, D. L. de. Variabilidade espacial de atributos do solo indicadores de degradação ambiental em microbacia hidrográfica. **Revista agro@mbiente on-line**, v. 11, n. 1, p. 11-20, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v11i1.3413>. Acesso em: 16 jan. 2020.

LIANG, S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, p. 213- 238, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00205-4). Acesso em: 20 jan. 2020.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Oficina de Textos, 2015.

LORENZZETTI, J.A. **Princípios físicos de sensoriamento remoto**. Editora Blucher, 2015.

LOULLI, E.; HADJIMITSIS, D. G. Remote sensing-based indices for drought assessment in the east Mediterranean region. **Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XX** , v. 10783, p. 40, 2018. SPIE. Disponível em: [10.1117/12.2325331](https://doi.org/10.1117/12.2325331). Acesso em: 22 fev. 2020.

LUCENA, J. A.; NÓBREGA, R. S.; WANDERLEY, L. S. DE A. Aspectos temporais, espaciais e rítmicos da variabilidade pluviométrica no Núcleo de Desertificação de Cabrobó/PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 06, p. 1784–1801, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/234063>. Acesso em: 16 mar. 2020.

MACEDO, M. J. H. et al. Análise do índice padronizado de precipitação para o estado da Paraíba, Brasil. **Ambiente & Água, An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 5, n. 1, p. 204-214, 2010. Disponível em: http://ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/download/419/pdf_225. Acesso em: 27 nov. 2019.

MALINGA, R.; GORDON, L. J.; JEWITT, G.; LINDBORG, R. Mapping ecosystem services across scales and continents—A review. **Ecosystem Services**, v. 13, p. 57-63, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.01.006>. Acesso em: 15 jan. 2020.

MANN, H. B., Non-parametric test against trend. **Econometrica**, n. 13, p. 245-259, 1945. Disponível em: 10.2307/1907187. Acesso em: 05 mar. 2020.

MARENCO, J. A. et al. Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas. MEDEIROS, S. D. S. et al. (Eds.). **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. p. 383–422. Disponível em: <https://portal.insa.gov.br/acervo-livros/196-recursos-hidricos-em-regioes-aridas-e-semiaridas>. Acesso em: 05 abril. 2020.

MARENCO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3–4, p. 1189–1200, ago. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>. Acesso em: 10 fev. 2020.

MARIANO, D. A. et al. Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and human-induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 213, p. 129-143, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.048>. Acesso em: 10 fev. 2020.

MATOS, R. C. DE M.; CANDEIAS, A. L. B.; TAVARES JUNIOR, J. R. Mapeamento Da Vegetação, Temperatura E Albedo Da Bacia Hidrográfica Do Pajeú Com Imagens MODIS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 1, p. 139–160, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265050917_MAPEAMENTO_DA_VEGETACA_O_TEMPERATURA_E_ALBEDO_DA_BACIA_HIDROGRAFICA_DO_PAJEU_COM_IMAGENS_MODIS. Acesso em: 28 jan. 2020.

MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT - MEA. **Ecosystems and human well-being: a framework for assessment**. Washington, D.C.: Island Press, 2003.

MORAES, E. C. DE. Fundamentos de sensoriamento remoto. MORAES, E. C. DE (Ed.). **Fundamentos de sensoriamento remoto**. 1. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002. v. Capítulo 1, p. 3–22.

NANZAD, L. et al. NDVI anomaly for drought monitoring and its correlation with climate factors over Mongolia from 2000 to 2016. **Journal of Arid Environments**, v. 164, p. 69–77, 2019. Disponível em: 10.1016/j.jaridenv.2019.01.019. Acesso em: 12 fev. 2020.

NERY, C. V. M. et al. Uso do Sensoriamento Remoto na Detecção de Mudança na Microrregião de Montes Claros/MG. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 1, p. 130–145, 8 abr. 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233124>. Acesso em: 14 ago. 2020.

NETO, M. C. P.; FERNANDES, E. Instabilidade emergente e aspectos de degradação ambiental da bacia hidrográfica do Rio Seridó (RN/PB-BRASIL). **Revista de Geografia**, v. 33, n.1, p. 84–97, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/229172>. Acesso em: 19 mar. 2020.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 3ª edição. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

OLIVEIRA, A. S. de et al. Tendências em índices extremos de precipitação e temperatura do ar na cidade de Uberaba, MG. **Sustentare**, v. 2, n. 1, p. 118–134, 30 jul. 2018. Disponível em: <http://periodicos.unincor.br/index.php/sustentare/article/view/4943>. Acesso em: 22 nov. 2019.

OLIVEIRA, É. A. T. M.; OLIVEIRA, L. J. DE. Mudanças climáticas no Nordeste Brasileiro e refugiados ambientais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 08, n. 04, p. 965–984, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233696>. Acesso em: 11 ago. 2020.

ORTEGA, D. J. P. **Avaliação dos efeitos das atividades antrópicas na bacia hidrográfica do Córrego do Ipê, município de Ilha Solteira – SP**. 2011. 151f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

PADOVANNI, N. G. et al. Análise espacial da temperatura e albedo de superfície na Bacia Hidrográfica do Rio Una – Ibiúna/São Paulo, a partir de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 5, p. 1832–1845, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/234633>. Acesso em: 25 jan. 2020.

PARENTE, L; FERREIRA, L. Assessing the spatial and occupation dynamics of the Brazilian pasturelands based on the automated classification of MODIS images from 2000 to 2016. **Remote Sensing**, v. 10, n. 4, p. 606, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs10040606>. Acesso em: 02 mar. 2020.

PARKER, D.C. et al. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: A review. **Annals of the Association of American Geographers**, 93, 314–337, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1467-8306.9302004>. Acesso em: 28 fev. 2020.

PATEL, N. N. et al. Multitemporal settlement and population mapping from Landsat using Google Earth Engine. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 35, p. 199-208, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.09.005>. Acesso em: 06 fev. 2020.

PEREIRA, O. et al. Assessing Pasture Degradation in the Brazilian Cerrado Based on the Analysis of MODIS NDVI Time-Series. **Remote Sensing**, v. 10, n. 11, p. 1761, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs10111761>. Acesso em: 05 fev. 2020.

PEREIRA, T. Influência Do Relevo Na Precipitação Das Regiões Hidrográficas Do Litoral Norte De Alagoas. **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, n. 33, p. 239, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2013.74314>. Acesso em: 07 dez. 2019.

PEREZ-MARIN, A. M. et al. Núcleos de desertificação no semiárido brasileiro: ocorrência natural ou antrópica? **Parcerias Estratégicas**, v. 17, n. 34, p. 87–106, 2012. Disponível em: http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/view/671/615 Acesso em: 15 mar. 2020.

PONZONI, F. J. ; SHIMABUKURO, Y. E. ; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 176p., 2.ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; PORFÍRIO DA ROCHA, R. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul O Sol como Fonte de Energia. **Terrae Didactica**, v.8, n.1, 2012. Acesso em: <https://www.ige.unicamp.br/terraedidactica/v8-1/pdf81/s3.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2020.

RIBEIRO, E. P. et al. Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças ambientais na bacia hidrográfica do rio Pajeú. **Revista de geografia**, v. 32, n. 1, p. 221–246, 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/229192>. Acesso em: 11 jan. 2020.

RIBEIRO, E. P. **Mudanças ambientais e desertificação na bacia hidrográfica do rio Pajeú**. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 178f, 2016.

ROBINOVE, C. J. et al. Arid Land Monitoring Using Landsat Albedo Difference Images. **Remote Sensing of Environment**. v. 11, p. 133-156. 1981. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(81\)90014-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(81)90014-6). Acesso em: 19 jan. 2020.

RODRIGUES, J. O. et al. Sazonalidade de variáveis biofísicas em regiões semiáridas pelo emprego do sensoriamento remoto. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 3, p. 452–465, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162009000300012>. Acesso em: 20 jan. 2020.

RODRIGUES, L. O. et al. Influência dos eventos de El Niño e La Niña no regime de precipitação do Agreste de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.10, n.6, p.1995-2009, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/235912>. Acesso em: 01 dez. 2019.

ROOY, M. P. V. A **Rainfall Anomaly Index Independent of Time and Space**. Notes, v. 14, p. 43, 1965.

RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO., Y.E.; CEBALLOS, J.C. Sensor Modis e Suas Aplicações Ambientais no Brasil. Editora Parêntese: São Paulo, 2007.

SALVADOR, M. D. A. **Análise Da Variabilidade Climática Na Nova Fronteira Agrícola Do Brasil** : Região Do Matopiba. 2014. 95 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 64–73, 1 jan. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbmet/v31n1/0102-7786-rbmet-31-01-0064.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2019.

SANTOS, A. L. S. et al. Propriedades Multifractais da Temperatura do Ar Diária no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 1, p. 23–31, mar. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786334012>. Acesso em: 27 fev. 2020.

SANTOS, C. A. C. DOS et al. Obtenção de Parâmetros Ambientais na Região Semiárida da Paraíba por Dados MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 633–647, 2017a. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-7786324011>. Acesso em: 16 jan. 2020.

SANTOS, E. F. N. et al. Validade da estatística na compreensão do clima para diagnóstico e previsão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, p. 1346–1354, 2017b. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/234052>. Acesso em: 10 ago. 2020.

SANTOS, F. et al. Comportamento Sazonal Do Albedo E Dos Índices De Vegetação Na Bacia Hidrográfica Do Alto Curso Do Rio Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 5, p. 1015–1023, 2 fev. 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233416>. Acesso em: 21 Jan. 2020.

SANTOS, M. T. P. do; FERREIRA, E. J.; FERREIRA, M. F. F. Estudo de caso da degradação ambiental do Rio Gorutuba no município de Francisco Sá. **Revista Cerrados**, v.15, n. 1, p. 265-284, 2017. Disponível em: 10.22238/rc24482692v15n12017p265a284. Acesso em: 15 ago. 2020.

SCHUCKNECHT, A. et al. Assessing vegetation variability and trends in north-eastern Brazil using AVHRR and MODIS NDVI time series. **European Journal of Remote Sensing**, v. 46, n. 1, p. 40–59, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5721/EuJRS20134603>. Acesso em: 23 fev. 2020.

SIDHU, N.; PEBESMA, E.; CÂMARA, G. Using Google Earth Engine to detect land cover change: Singapore as a use case. **European Journal of Remote Sensing**, v. 51, n. 1, p. 486-500, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1451782>. Acesso em: 04 fev. 2020.

SILVA, A. K. DE O.; SILVA, H. P. DE B. O Processo De Desertificação E Seus Impactos Sobre Os Recursos Naturais E Sociais No Município De Cabrobó – Pernambuco – Brasil.

Revista Eletrônica de Humanidades do Curso de Ciências Sociais da UNIFAP, v. 8, p. 203–215, 2015. Disponível em: <https://periodicos.unifap.br/index.php/pracs/article/view/1315>. Acesso em: 15 mar. 2020.

SILVA, I. A. S. **Clima e arenização em Gilbués-Piauí: dinâmica das precipitações e a vulnerabilidade da paisagem aos eventos pluviiais intensos**. 2014. 185 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

SILVA, J. M. O. Utilização de anos-padrão no estudo da variabilidade pluviométrica no município do Crato-Ceará. In: Congresso Nacional de Geografia Física, 1, 2017, Campinas-SP. **Anais...** Campinas: Instituto de Geociência, 2017.

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

SILVA, L. G.; GALVÍNCIO, J. D. Análise comparativa da variação nos índices NDVI e SAVI no Sítio PELD – 22, em Petrolina – PE, na primeira década do século XXI. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 6, p. 1446-1456, 2012. Disponível em: 10.26848/rbgf.v5.6.p1446-1456. Acesso em: 24 jan. 2020.

SILVA, J. L. B. et al. Spatial-Temporal Monitoring of the Risk of Environmental Degradation and Desertification by Remote Sensing in a Brazilian Semiarid Region. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13., p. 544-56, 2020. Disponível em: 10.26848/rbgf.v13.2.p544-563. Acesso em: 09 fev. 2020.

SILVA, J. L. B. et al. Spatial-temporal dynamics of the Caatinga vegetation cover by remote sensing in municipality of the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 4, p. 1-10, 2019. Disponível em: 10.5039/agraria.v14i4a7128. Acesso em: 16 jan. 2020.

SILVA, P. C. G. DA et al. Caracterização do Semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos. SÁ, I. B.; SILVA, P. C. G. DA (Eds.). **Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. p. 18–48.

SNEYERS, R. **Sur L'analyse Statistique Des Séries D'observations**: Note Technique N. 143. Secrétariat de l'Organisations Météorologique Mondiale, 1975.

SOARES, D. B.; MOTA FILHO, F. DE O.; NÓBREGA, R. S. Sobre o Processo de Desertificação. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.1, p.174-188, 2011. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/232699>. Acesso em: 18 mar. 2020.

SOUSA, I. A. S. Conexões Entre Clima e Desertificação: trajetórias e suscetibilidade no nordeste brasileiro. **Revista Equador**, v. 8, n. 2, p. 468–488, 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpi.br/index.php/equador/article/view/9265>. Acesso em: 18 mar. 2020.

SOUZA, E.B.; MANZI, A. O. **Mudanças ambientais de curto e longo prazo: projeções, reversibilidade e atribuição.** Ambrizzi, Tércio & Araujo, Moacir. Base científica das mudanças climáticas.

SOUZA, L. et al. Sazonalidade da Vegetação em Função do Regime Pluviométrico no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 5, p. 905–914, 27 jan. 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233408>. Acesso em: 29 jan. 2020.

TANG, X. et al. Remotely Monitoring Ecosystem Water Use Efficiency of Grassland and Cropland in China's Arid and Semi-Arid Regions with MODIS Data. **Remote Sensing**, v. 9, n. 6, jun. 2017. Disponível em: 10.3390/rs9060616. Acesso em: 14 mar. 2020.

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

TOMASELLA, J. et al. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 197–206, 2018. Disponível em: 10.1016/J.JAG.2018.06.012. Acesso em: 16 fev. 2020.

TREVISAN, D. P. **Análise das variáveis ambientais causadas pelas mudanças dos usos e cobertura da terra do município de São Carlos**, São Paulo, Brasil. 2015. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de São Carlos.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: **Ciência e Aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009. 943p.

VALERIANO, M. de M.; ROSSETTI, D. de F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, n. 2, p. 300–309, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.05.004>. Acesso em: 02 ago. 2020.

VOROVENCII, I. Assessing and monitoring the risk of desertification in Dobrogea, Romania, using Landsat data and decision tree classifier. **Environmental monitoring and assessment**, v.187, n. 204, p.1-17, 2015. Disponível em: 10.1007/s10661-015-4428-3. Acesso em: 19 mar. 2020.

WARD, J.H. Hierarchical grouping of optimize an objective function. **Journal American Statistical Association**, v.58, p.236-244, 1963. Disponível em: 10.1080/01621459.1963.10500845. Acesso em: 06 nov. 2019.

XU, D. et al. Quantitative assessment of desertification using Landsat data on a regional scale – a case study in the Ordos Plateau, China. **Sensors**, v. 9, n. 3, p. 1738–1753, 2009. Disponível em: 10.3390/s90301738. Acesso em: 22 mar. 2020.

ZHANG, J.; OKIN, G. S.; ZHOU, B. Assimilating optical satellite remote sensing images and field data to predict surface indicators in the Western U.S.: Assessing error in satellite predictions based on large geographical datasets with the use of machine learning. **Remote**

Sensing of Environment, v. 233, n. August, p. 111382, 2019. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111382>. Acesso em: 26 jan. 2020.

ZOFFOLI, M. L. et al. Seasonal and interannual analysis of wetlands in South America using NOAA-AVHRR NDVI time series: The case of the Parana Delta Region. **Landscape Ecology**, v. 23, n. 7, p. 833–848, 31 ago. 2008. Disponível em:
<https://doi.org/10.1007/s10980-008-9240-9>. Acesso em: 07 ago. 2020.

ZOUNGRANA, B. J. B. et al. MODIS NDVI trends and fractional land cover change for improved assessments of vegetation degradation in Burkina Faso, West Africa. **Journal of Arid Environments**, v. 153, p. 66–75, 2018. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.01.005>. Acesso em: 03 fev. 2020.

APÊNDICE A - Lista dos Postos Pluviométricos com as respectivas coordenadas.

Tabela A.1 – lista dos Postos Pluviométricos

Identificação	Postos	Agência	X	Y	Z
1	Saloá	APAC	-36.6667	-8.95	850
2	Jurema	APAC	-36.1333	-8.71667	640
3	Garanhuns	INMET	-36.4833	-8.88333	866
4	Frei Miguelinho	APAC	-35.9088	-7.94165	18
5	Toritama	APAC	-36.0667	-8.01667	376
6	Santa Cruz do Capibaribe	INMET	-36.2022	-7.96194	472
7	Altinho	APAC	-36.0833	-8.48333	470
8	Camocim de São Félix	APAC	-35.7667	-8.35	723
9	Bom Jardim	APAC	-35.5833	-7.8	325
10	Machados	APAC	-35.5167	-7.68333	320
11	Limoeiro	ANA	-35.5167	-7.86667	138
12	Águas Belas	ANA	-37.1317	-9.10556	376
13	Tupanatinga	APAC	-37.35	-8.75	709
14	Caruaru	APAC	-35.9667	-8.28333	545
15	Belo Jardim	APAC	-36.4333	-8.33333	650
16	Brejo da Madre de Deus	ANA	-36.3703	-8.14556	646
17	Ipubi	APAC	-40.1489	-7.65194	535
18	Araripina	APAC	-40.4983	-7.57611	622
19	Mirandiba	APAC	-38.7333	-8.13333	400
20	Serrita (Cartório)	APAC	-39.3	-7.95	425
21	Cedro	APAC	-39.3333	-7.71667	610
22	Inajá	INMET	-37.8333	-8.9	355
23	Arcoverde	INMET	-37.0833	-8.41667	681
24	Sertânia	APAC	-37.2833	-8.08333	500
25	Serra Talhada	APAC	-38.3	-7.98333	435
26	Flores	ANA	-37.85	-8.08333	580
27	Afogados da Ingazeira	ANA	-37.6483	-7.73889	525
28	Cortês	APAC	-35.55	-8.46667	340
29	Palmares	APAC	-35.6	-8.68333	109
30	Rio Formoso	APAC	-35.15	-8.66667	39
31	Timbaúba	APAC	-35.3167	-7.51667	190
32	Carpina	ANA	-35.2547	-7.85083	184
33	Paudalho	ANA	-35.1733	-7.89417	69
34	Vitória de Santo Antão	APAC	-35.3167	-8.13333	137

35	Glória do Goitá	ANA	-35.2928	-8.00167	158
36	Pombos	APAC	-35.3997	-8.14083	290
37	Igarassu	APAC	-34.9	-7.83333	22
38	Cabo	APAC	-35.0333	-8.3	30
39	Recife	ANA	-34.9167	-8.05	10
40	Petrolândia	APAC	-38.299	-9.06667	286
41	Belém do São Francisco	ANA	-38.9667	-8.73333	300
42	Tacaratu	APAC	-38.15	-9.1	550
43	Petrolina	APAC	-40.5	-9.38333	376
44	Orocó	ANA	-39.6	-8.6	300
45	Santa Maria da Boa Vista	ANA	-39.8333	-8.8	452

APÊNDICE B - Script do Google Earth Engine para a cálculo dos parâmetros biofísicos no MODIS, análise estatística e sazonalidade dos anos extremos.

```
//Definição da função com parâmetros biofísicos para MODIS MOD09GA1
var parâmetros = function(image)
{
  //NDVI
  var ndvi= image.normalizedDifference(['sur_refl_b02','sur_refl_b01']);
  image = image.addBands(ndvi.rename('NDVI'));

  //NDWI
  var ndwi= image.normalizedDifference(['sur_refl_b02','sur_refl_b07']);
  image = image.addBands(ndwi.rename('NDWI'));

  //EVI
  var evi = image.expression(
    '2.5 * (nir - red) / (nir + 6 * red - 7.5 * blue + 1)',
    {
      red: image.select('sur_refl_b01').multiply(0.0001), // 620-670nm, RED
      nir: image.select('sur_refl_b02').multiply(0.0001), // 841-876nm, NIR
      blue: image.select('sur_refl_b03').multiply(0.0001) // 459-479nm, BLUE
    });
  image = image.addBands(evi.rename('EVI'));

  //SAVI
  var savi = image.expression(
    '((1 + L) * (nir - red)) / (nir + red + L)',
    {
      red: image.select('sur_refl_b01').multiply(0.0001), // 620-670nm, RED
      nir: image.select('sur_refl_b02').multiply(0.0001), // 841-876nm, NIR
      L: 0.1
    });
  image = image.addBands(savi.rename('SAVI'));

  //Albedo Superfície
  var albedosup = image.expression(
    '(0.215 * r1) + (0.215 * r2) + (0.242 * r3) + (0.129 * r4) + (0.101 * r5) + (0.062 * r6)-
    (0.036*r7)',
    {
      r1: image.select('sur_refl_b01').multiply(0.0001),
      r2: image.select('sur_refl_b02').multiply(0.0001),
      r3: image.select('sur_refl_b03').multiply(0.0001),
      r4: image.select('sur_refl_b04').multiply(0.0001),
      r5: image.select('sur_refl_b05').multiply(0.0001),
      r6: image.select('sur_refl_b06').multiply(0.0001),
      r7: image.select('sur_refl_b07').multiply(0.0001)
    });
  image = image.addBands(albedosup.rename('ALBEDO-SUP'));
```



```

return image;
};

//Definição da função de temperatura MOD11

var temperatura = function(image)
{
  var temp = image.expression(
    'tempk - 273.15',
    {
      tempk: image.select('LST_Day_1km').multiply(0.02),
    });

  image = image.addBands(temp.rename('temperatura'));

return image;
};

//Definição da Coleção de Imagens MODIS MOD09A1
var modisparametros = ee.ImageCollection('MODIS/006/MOD09A1')
  .filterDate('2000-01-01','2019-12-31')
  .map(parametros);

//Definição da Coleção de Imagens MODIS MOD11A1 - Temperatura

var modistemperatura = ee.ImageCollection('MODIS/006/MOD11A2')
  .filterDate('2000-01-01','2019-12-31')
  .map(temperatura);

//Paleta de cor
var palette_iv = ['120200','ce7e45','df923d','f1b555','fcd163','99b718','81bc01','239507'];
//Paleta dos Parâmetros de Índice de Vegetação
var palette_albedo = ['040225', '157c03', '19e632', 'f0ff10', 'ffa319', 'd8663a', 'ff2f0e', '4be6ff', '1a82ed', '021ddc']; //Paleta para o Albedo
var palette_temperatura = ['239507','5de045','59fd06','f9f215','d09845','c01f04','d62205'];
//Paleta para Temperatura
var palette_ndwi = ['f9fffe','dbdcba','9eb4ad','725d5a','0afcfc','48c8c8','299499','070cb4'];
//Paleta dos Parâmetros de Índice de Água
var palette_bsi = ['040225','8e8f81','0518a3','0751c0','06c6ff','2d8340','449309','36c025','1dd607','19ff0a','a36437','ce7e45','ce9b49','f1b555','cfda2d','d9ff06']; //Paleta BSI

//Gráficos
var lon = ui.Label();
var lat = ui.Label();

```

```

Map.onClick(function(coords)
{
  //Update the lon/lat panel with values from the click event.
  lon.setValue('lon: ' + coords.lon.toFixed(2)),
  lat.setValue('lat: ' + coords.lat.toFixed(2));

  // Adicionar um ponto vermelho no ponto clicado.
  var point = ee.Geometry.Point(coords.lon, coords.lat);
  var chart = ui.Chart.image.series(modisparametros.select('NDVI','NDWI'), point);
  chart.setOptions
  ({
    title: 'Índice de Vegetação ao longo do tempo',
    vAxis: {title: 'Valor'},
    hAxis: {title: 'data', format: 'MM-yy', gridlines: {count: 7}},
  });

  // Adicionar gráfico ao mapa.

  chart.style().set
  ({
    position: 'bottom-right',
    width: '500px',
    height: '300px'
  });
  Map.add(chart);
});

// Ajuste da imagem a ser gerada a estatística
var image1 = modisparametros
  .filterDate('2015-12-01','2015-12-31')
  .max()
  .clip(pe)
  .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var image2 = modistemperatura
  .filterDate('2015-12-01','2015-12-31')
  .max()
  .clip(pe)
  .select('temperatura');

//Geração de Mapas Anuais - 2000 até 2019
//Ajuste do critério de redução da imagem anual

//2000
var imagep2000 = modisparametros

```

```

        .filterDate('2000-01-01','2000-12-31')
        .max()
        .clip(pe)
        .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imaget2000 = modistemperatura
    .filterDate('2000-01-01','2000-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');

//2001
var imagep2001 = modisparametros
    .filterDate('2001-01-01','2001-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imaget2001 = modistemperatura
    .filterDate('2001-01-01','2001-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');

//2002
var imagep2002 = modisparametros
    .filterDate('2002-01-01','2002-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imaget2002 = modistemperatura
    .filterDate('2002-01-01','2002-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');

//2003
var imagep2003 = modisparametros
    .filterDate('2003-01-01','2003-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imaget2003 = modistemperatura
    .filterDate('2003-01-01','2003-12-31')

```

```

        .max()
        .clip(pe)
        .select('temperatura');
//2004
var imagep2004 = modisparametros
    .filterDate('2004-01-01','2004-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imaget2004 = modistemperatura
    .filterDate('2004-01-01','2004-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');
//2005
var imagep2005 = modisparametros
    .filterDate('2005-01-01','2005-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imaget2005 = modistemperatura
    .filterDate('2005-01-01','2005-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');
//2006
var imagep2006 = modisparametros
    .filterDate('2006-01-01','2006-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imaget2006 = modistemperatura
    .filterDate('2006-01-01','2006-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');
//2007
var imagep2007 = modisparametros
    .filterDate('2007-01-01','2007-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

```

```

var imaget2007 = modistemperatura
    .filterDate('2007-01-01','2007-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');
//2008
var imagep2008 = modisparametros
    .filterDate('2008-01-01','2008-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imaget2008 = modistemperatura
    .filterDate('2008-01-01','2008-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');
//2009
var imagep2009 = modisparametros
    .filterDate('2009-01-01','2009-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imaget2009 = modistemperatura
    .filterDate('2009-01-01','2009-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');
//2010
var imagep2010 = modisparametros
    .filterDate('2010-01-01','2010-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imaget2010 = modistemperatura
    .filterDate('2010-01-01','2010-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');
//2011
var imagep2011 = modisparametros
    .filterDate('2011-01-01','2011-12-31')
    .max()

```

```

.clip(pe)
.select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imaget2011 = modistemperatura
  .filterDate('2011-01-01','2011-12-31')
  .max()
  .clip(pe)
  .select('temperatura');
//2012
var imagep2012 = modisparametros
  .filterDate('2012-01-01','2012-12-31')
  .max()
  .clip(pe)
  .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imaget2012 = modistemperatura
  .filterDate('2012-01-01','2012-12-31')
  .max()
  .clip(pe)
  .select('temperatura');
//2013
var imagep2013 = modisparametros
  .filterDate('2013-01-01','2013-12-31')
  .max()
  .clip(pe)
  .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imaget2013 = modistemperatura
  .filterDate('2013-01-01','2013-12-31')
  .max()
  .clip(pe)
  .select('temperatura');
//2014
var imagep2014 = modisparametros
  .filterDate('2014-01-01','2014-12-31')
  .max()
  .clip(pe)
  .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imaget2014 = modistemperatura
  .filterDate('2014-01-01','2014-12-31')
  .max()
  .clip(pe)
  .select('temperatura');
//2015

```

```
var imagep2015 = modisparametros
    .filterDate('2015-01-01','2015-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');
```

```
var imaget2015 = modistemperatura
    .filterDate('2015-01-01','2015-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');
```

```
//2016
```

```
var imagep2016 = modisparametros
    .filterDate('2016-01-01','2016-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');
```

```
var imaget2016 = modistemperatura
    .filterDate('2016-01-01','2016-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');
```

```
//2017
```

```
var imagep2017 = modisparametros
    .filterDate('2017-01-01','2017-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');
```

```
var imaget2017 = modistemperatura
    .filterDate('2017-01-01','2017-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');
```

```
//2018
```

```
var imagep2018 = modisparametros
    .filterDate('2018-01-01','2018-12-31')
    .max()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');
```

```
var imaget2018 = modistemperatura
    .filterDate('2018-01-01','2018-12-31')
    .max()
```

```

        .clip(pe)
        .select('temperatura');
//2019
var imagep2019 = modisparametros
    .filterDate('2019-01-01','2019-12-31')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imaget2019 = modistemperatura
    .filterDate('2019-01-01','2019-12-31')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');

//Ajuste da sazonalidade - Imagens Mensais
//Imagem de Janeiro até Dezembro
//Ajuste manual o ano de interesse

//Janeiro
var imagejan1 = modisparametros
    .filterDate('2012-01-01','2012-01-31')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imagejan2 = modistemperatura
    .filterDate('2012-01-01','2012-01-31')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');

//Fevereiro
var imagefev1 = modisparametros
    .filterDate('2012-02-01','2012-02-28')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imagefev2 = modistemperatura
    .filterDate('2012-02-01','2012-02-28')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');

```



```

//Março
var imagemar1 = modisparametros
    .filterDate('2012-03-01','2012-03-31')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imagemar2 = modistemperatura
    .filterDate('2012-03-01','2012-03-31')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');

//Abril
var imageabr1 = modisparametros
    .filterDate('2012-04-01','2012-04-30')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imageabr2 = modistemperatura
    .filterDate('2012-04-01','2012-04-30')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');

//Maio
var imagemai1 = modisparametros
    .filterDate('2012-05-01','2012-05-31')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imagemai2 = modistemperatura
    .filterDate('2012-05-01','2012-05-31')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');

//Junho
var imagejun1 = modisparametros
    .filterDate('2012-06-01','2012-06-30')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

```

```

var imagejun2 = modistemperatura
    .filterDate('2012-06-01','2012-06-30')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');

//Julho
var imagejul1 = modisparametros
    .filterDate('2012-07-01','2012-07-31')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imagejul2 = modistemperatura
    .filterDate('2012-07-01','2012-07-31')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');

//Agosto
var imageago1 = modisparametros
    .filterDate('2012-08-01','2012-08-31')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imageago2 = modistemperatura
    .filterDate('2012-08-01','2012-08-31')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');

//Setembro
var imageset1 = modisparametros
    .filterDate('2012-09-01','2012-09-30')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imageset2 = modistemperatura
    .filterDate('2012-09-01','2012-09-30')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');

//Outubro
var imageout1 = modisparametros
    .filterDate('2012-10-01','2012-10-31')

```

```

        .mean()
        .clip(pe)
        .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imageout2 = modistemperatura
    .filterDate('2012-10-01','2012-10-31')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');

//Novembro
var imagenov1 = modisparametros
    .filterDate('2012-11-01','2012-11-30')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imagenov2 = modistemperatura
    .filterDate('2012-11-01','2012-11-30')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');

//Dezembro
var imagedez1 = modisparametros
    .filterDate('2012-12-01','2012-12-31')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('NDVI','EVI','NDWI', 'SAVI','ALBEDO-SUP');

var imagedez2 = modistemperatura
    .filterDate('2012-12-01','2012-12-31')
    .mean()
    .clip(pe)
    .select('temperatura');

// Redução da Região da Coleção 1 (Image1) , de acordo com a estatística desejada.

var media1 = imagep2019.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  geometry: pe.geometry(),
  scale: 500,
  maxPixels: 1e20
});

var desvio1 = imagep2019.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.stdDev(),
  geometry: pe.geometry(),

```

```
    scale: 500,  
    maxPixels: 1e20  
  });
```

```
var max1 = imagep2019.reduceRegion({  
  reducer: ee.Reducer.max(),  
  geometry: pe.geometry(),  
  scale: 500,  
  maxPixels: 1e20  
});
```

```
var min1 = imagep2019.reduceRegion({  
  reducer: ee.Reducer.min(),  
  geometry: pe.geometry(),  
  scale: 500,  
  maxPixels: 1e20  
});
```

```
// O resultado da Estatística da Coleção 1 - Imprimir resultado.  
print(media1,desvio1,max1,min1);
```

```
// Redução da Região da Coleção 2 (Image2) , de acordo com a estatística desejada.
```

```
var media2 = imaget2019.reduceRegion({  
  reducer: ee.Reducer.mean(),  
  geometry: pe.geometry(),  
  scale: 1000,  
  maxPixels: 1e20  
});
```

```
var desvio2 = imaget2019.reduceRegion({  
  reducer: ee.Reducer.stdDev(),  
  geometry: pe.geometry(),  
  scale: 1000,  
  maxPixels: 1e20  
});
```

```
var max2 = imaget2019.reduceRegion({  
  reducer: ee.Reducer.max(),  
  geometry: pe.geometry(),  
  scale: 1000,  
  maxPixels: 1e20  
});
```

```
var min2 = imaget2019.reduceRegion({  
  reducer: ee.Reducer.min(),  
  geometry: pe.geometry(),  
  scale: 1000,  
});
```

```

    maxPixels: 1e20
  });
// O resultado da Estaística da Coleção 2 - Imprimir resultado.

print(media2,desvio2,max2,min2);

//Extração de dados pontuais na série de tempo

// Definindo a faixa de tempo
var startyear = 2015;
var endyear = 2019;

// Definindo a data em formato ee
var startdate = ee.Date.fromYMD(startyear,1,1);
var enddate = ee.Date.fromYMD(endyear,12,31)

// criando a lista dos anos
var years = ee.List.sequence(startyear,endyear);

// Fazendo a lista dos meses
var months = ee.List.sequence(1,12);

// Filtrando a coleção MODIS
var Fmodisparametros = modistemperatura.filterDate(startdate, enddate)
  // Sort chronologically in descending order.
  .sort('system:time_start', false)
  .filterBounds(postos);

// Calculando os parâmetro mensal

var Monthlymodisparametros = ee.ImageCollection.fromImages(
  years.map(function (y) {
    return months.map(function(m){
      var w = Fmodisparametros.filter(ee.Filter.calendarRange(y, y, 'year'))
        .filter(ee.Filter.calendarRange(m, m, 'month'))
        .mean();
      return w.set('year', y)
        .set('month', m)
        .set('system:time_start',ee.Date.fromYMD(y,m,1))
        .set('date', ee.Date.fromYMD(y,m,1))
    });
  }).flatten());

// Definindo as configurações do Gráfico.
var title = {
  title: 'Parâmetro Biofísico',
  hAxis: {title: 'Time'},
  vAxis: {title: 'Temperatura'},
};

```

```

// create a chart with a reducer
var chart = ui.Chart.image.seriesByRegion(
  Monthlymodisparametros, postos, ee.Reducer.mean(), 'temperatura', 1000,
'system:time_start', 'postos')
  .setOptions(title);

print(chart)

//Extrair das amostras de pontos
// create a chart with a reducer
var chart1 = ui.Chart.image.byRegion(
  imagep2000, postos, ee.Reducer.mean(), 500, 'postos').setChartType('ColumnChart');

var chart2 = ui.Chart.image.byRegion(
  imaget2000, postos, ee.Reducer.mean(), 500, 'postos').setChartType('ColumnChart');

print(chart1,chart2)

//Geração dos mapas
//Geração de Mapas Mensais
//Ajuste do Parâmetro biofísico visualizado

Map.addLayer(imagejan1,{min: -1, max: 1,bands:['NDVI'], palette: palette_iv},'Jan');
Map.addLayer(imagefev1,{min: -1, max: 1,bands:['NDVI'], palette: palette_iv},'Fev');
Map.addLayer(imagemar1,{min: -1, max: 1,bands:['NDVI'], palette: palette_iv},'Mar');
Map.addLayer(imageabr1,{min: -1, max: 1,bands:['NDVI'], palette: palette_iv},'Abril');
Map.addLayer(imagemai1,{min: -1, max: 1,bands:['NDVI'], palette: palette_iv},'Maio');
Map.addLayer(imagejun1,{min: -1, max: 1,bands:['NDVI'], palette: palette_iv},'Junho');
Map.addLayer(imagejul1,{min: -1, max: 1,bands:['NDVI'], palette: palette_iv},'Julho');
Map.addLayer(imageago1,{min: -1, max: 1,bands:['NDVI'], palette: palette_iv},'Agosto');
Map.addLayer(imageset1,{min: -1, max: 1,bands:['NDVI'], palette: palette_iv},'Setembro');
Map.addLayer(imageout1,{min: -1, max: 1,bands:['NDVI'], palette: palette_iv},'Outubro');
Map.addLayer(imagenov1,{min: -1, max: 1,bands:['NDVI'], palette:
palette_iv},'Novembro');
Map.addLayer(imagedez1,{min: -1, max: 1,bands:['NDVI'], palette:
palette_iv},'Dezembro');

//Geração de Mapas Anuais
//Ajuste do Parâmetro biofísico visualizado

Map.addLayer(imagep2000,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-
2000');
Map.addLayer(imagep2001,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-
2001');
Map.addLayer(imagep2002,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-
2002');
Map.addLayer(imagep2003,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-
2003');

```

```

Map.addLayer(imagep2004,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-2004');
Map.addLayer(imagep2005,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-2005');
Map.addLayer(imagep2006,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-2006');
Map.addLayer(imagep2007,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-2007');
Map.addLayer(imagep2008,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-2008');
Map.addLayer(imagep2009,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-2009');
Map.addLayer(imagep2010,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-2010');
Map.addLayer(imagep2011,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-2011');
Map.addLayer(imagep2012,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-2012');
Map.addLayer(imagep2013,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-2013');
Map.addLayer(imagep2014,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-2014');
Map.addLayer(imagep2015,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-2015');
Map.addLayer(imagep2016,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-2016');
Map.addLayer(imagep2017,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-2017');
Map.addLayer(imagep2018,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-2018');
Map.addLayer(imagep2019,{min: -1, max: 1,bands:['NDWI'], palette: palette_iv},'NDWI-2019');

```

```
// Criando a visualização dos parâmetros
```

```
var viz = {min:25, max:50, palette: palette_temperatura};
```

```
// Definir posição do painel
```

```
var legend = ui.Panel({
  style: {
    position: 'middle-left',
    stretch: 'horizontal',
    padding: '15px 25px',
    fontWeight: 'bold',
    textAlign: 'center',
  }
});
```

```

// Criar um título da legenda
var legendTitle = ui.Label({
  value: 'NDVI',
  style: {
    fontWeight: 'bold',
    stretch: 'horizontal',
    fontSize: '24px',
    margin: '0 0 4px 0',
    padding: '0'
  }
});

//Adicionar o título ao painel
legend.add(legendTitle);

// Criar a legenda da imagem
var lon = ee.Image.pixelLonLat().select('latitude');
var gradient = lon.multiply((viz.max-viz.min)/100.0).add(viz.min);
var legendImage = gradient.visualize(viz);

// Criando o texto no gradiente
var panel = ui.Panel({
  widgets: [
    ui.Label(viz['max'])
  ],style: {
    padding: '15px 17px',
    fontWeight: 'bold',
    textAlign: 'center'
  }
});

legend.add(panel);

// Criando o o gradiente da imagem
var thumbnail = ui.Thumbnail({
  image: legendImage,
  params: {bbox:'0,0,10,100', dimensions:'50x300'},
  style: {padding: '1px', position: 'top-center', stretch: 'horizontal'}
});

// Adicionar o gradiente da legenda
legend.add(thumbnail);

// Criando o texto na legenda
var panel = ui.Panel({
  widgets: [
    ui.Label(viz['min'])
  ],style: {

```



```
padding: '15px 17px',  
stretch: 'horizontal',  
fontWeight: 'bold',  
textAlign: 'center'  
}  
});
```

```
legend.add(panel);
```

```
Map.add(legend);
```