



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

VICTÓRIA VASCONCELOS FREITAS

**AVALIAÇÃO DO TVDI (TEMPERATURE VEGETATION DRYNESS
INDEX) COMO ÍNDICE PARA ESTIMAR ESTRESSE HÍDRICO NA REGIÃO
NORDESTE DO BRASIL (2014-2020)**

FORTALEZA

2021

VICTÓRIA VASCONCELOS FREITAS

AVALIAÇÃO DO TVDI (TEMPERATURE VEGETATION DRYNESS INDEX) COMO
ÍNDICE PARA ESTIMAR ESTRESSE HÍDRICO NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL
(2014-2020)

Monografia apresentada ao Curso de Graduação
em Ciências Ambientais do Instituto de
Ciências do Mar da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Ciências Ambientais.
Orientador: Prof. Dr. Antonio Geraldo Ferreira.

FORTALEZA

2021

Página reservada para ficha catalográfica.

Utilize a ferramenta *online* Catalog! para elaborar a ficha catalográfica de seu trabalho acadêmico, gerando-a em arquivo PDF, disponível para download e/ou impressão.

(<http://www.fichacatalografica.ufc.br/>)

VICTÓRIA VASCONCELOS FREITAS

AVALIAÇÃO DO TVDI (TEMPERATURE VEGETATION DRYNESS INDEX) COMO
ÍNDICE PARA ESTIMAR ESTRESSE HÍDRICO NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL
(2014-2020)

Monografia apresentada ao Curso de Graduação
em Ciências Ambientais do Instituto de
Ciências do Mar da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Ciências Ambientais.

Aprovada em: ___ / ___ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Geraldo Ferreira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Karinne Reis Deusdará Leal
Universidade Federal do Ceará (UFC)

MSc Robson Franklin Vieira Silva
Pesquisador da FUNCEME

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto de muito esforço e dedicação, não apenas da minha parte, mas especialmente da minha família. Agradeço aos meus pais, Socorro e Tarcisio que me apoiaram desde o começo. De acordar às 4 da manhã, aos gastos com passagens e tantas coisas, sempre fizeram o possível pra me ajudar. Agradeço também ao meu irmão, Thiago, que faz parte da minha motivação na busca de um futuro melhor.

Agradeço ao meu avô, Sebastião Gomes, minha tia, Joelma Gomes, meu tio |Luciano Gomes meu tio Fernando Gomes por todo acolhimento e amor no ano de 2017/2018. Agradeço à Dona Margareth e Seu Ribamar por me receber em sua casa em 2019, sempre com muito carinho e ao César que se tornou um irmão. Agradeço também à Dona Raimunda Mendes que me acolheu no segundo semestre de 2019, por todas as conversas e aprendizado. Graças a cada uma dessas pessoas eu pude chegar ao fim da graduação.

Ao professor Geraldo, meu orientador, pela confiança, conversas e ajuda, além de toda a experiência ímpar que tive no EOLLAB. Agradeço aos colegas de laboratório também, pelos conhecimentos, angústias e realizações compartilhados. Agradeço à banca examinadora por ceder seu tempo para auxiliar neste trabalho.

Agradeço aos colegas de turma 2017.1. Agradeço de coração a cada um que formou a panelinha: Amália, César, Ísis, Ítalo, Iury, Letícia e Vanessa. Cada momento bom foi melhor ao ter vocês junto e cada momento ruim foi mais leve pelo mesmo motivo. Amália e Letícia, obrigada pela cumplicidade e por todo apoio <3; César, obrigada por cuidar de mim, rir comigo e fofocar bastante; Ítalo, obrigada por topar tudo e me ajudar a andar em Fortaleza, fazer de tudo pra me ajudar; Iury, obrigada pelas conversas e momentos juntos; Vanessa e Isis, obrigada pela parceria e vergonhas nos corredores do Labomar.

Aos professores de Ciências Ambientais que contribuíram para meu processo de formação, especialmente, Rodrigo Rodrigues, Danielle Sequeira, Oscarina Sousa, Eduardo Lacerda, Marcelo Soares, Cristina Rocha, Fábio Matos e Janaina Melo.

À Giovanna, Cristefânia e Kauan, pessoas que conheci em períodos diferentes, mas também guardo imenso carinho e apreço.

RESUMO

O fenômeno da seca é um evento natural que afeta muitas regiões no mundo. Esta condição traz diversas consequências negativas, como perdas econômicas, epidemias e degradação das terras, principalmente para países em desenvolvimento, como o Brasil. A região do Nordeste brasileiro (NEB) convive com a seca há anos, contando com mais de 40 ocorrências. O monitoramento desse evento se torna importante como medida para garantir o gerenciamento de recursos hídricos e qualidade de vida à população. Atualmente, uma das formas de monitorar o estresse hídrico, é por meio do TVDI (Temperature Dryness Index). Este índice, calculado a partir de dados de satélite (Terra/MODIS), estima o estresse hídrico na vegetação e umidade do solo, variando de 0 (condição úmida) a 1 (condição seca). Após ser estimado para o Nordeste, nos meses de maio e setembro, entre os anos de 2014 e 2020, o TVDI foi analisado qualitativamente, em comparação a dados de umidade do solo (satélite SMOS) e ao Monitor de Secas. O produto gerado neste trabalho indicou potencial de ser utilizado como ferramenta para monitorar o estresse hídrico na vegetação e no solo, podendo ser incluído futuramente aos dados auxiliares do Monitor.

Palavras-chave: TVDI. SMOS. MODIS. Monitor de Secas. Região Nordeste.

ABSTRACT

Drought is a natural phenomenon that affects many places throughout the globe. This natural event brings forth several negative consequences, related to economic losses, epidemics and land degradation, especially common for developing countries, such as Brazil. The Brazilian Northeast region (NEB) has suffered with drought for years, with more than 40 occurrences. The monitoring of this event is an important measure to guarantee the management of water resources and maintain the quality of life of the population. Currently, one of the many ways to monitor hydric stress is through the TVDI (Temperature Dryness Index). This index, calculated from satellite data (Terra/MODIS), estimates hydric stress on vegetation and soil moisture, ranging from 0 (wet condition) to 1 (dry condition). After being estimated for the Northeast region, in the months of May and September, between the years 2014 and 2020, the TVDI was analyzed qualitatively, in comparison with data on soil moisture (SMOS satellite) and the Drought Monitor. The product thus generated, indicated the potential to be used as a tool to monitor hydric stress in vegetation and soil, and also may be included in the Monitor's auxiliary data in the future.

Keywords: TVDI. SMOS. MODIS. Drought Monitor. Northeast Region.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Classificação climática de Koppen, de acordo com Alvares <i>et al.</i> (2013)	18
Figura 2	– Exemplo de anomalias de TSM indicando El Niño (A) e La Niña (B)	20
Figura 3	– Influência do Oceano Atlântico Tropical na modulação de anos com precipitação (a) normal/acima da média e (b) abaixo da média climatológica para a parte norte do NEB	20
Figura 4	– Regimes pluviométricos do NEB	21
Figura 5	– Biomas do Nordeste brasileiro	22
Figura 6	– Gráfico de dispersão da relação NDVI/Ts	26
Figura 7	– Satélite Terra e seus sensores	27
Figura 8	– Satélite SMOS	28
Figura 9	– Localização da área de estudo	30
Figura 10	– Fluxograma de desenvolvimento do TVDI	31
Figura 11	– Curva de distribuição normal gaussiana	32
Figura 12	– Fluxograma de manipulação dos arquivos de umidade	33
Figura 13	– Fluxograma de manipulação dos arquivos de precipitação	34
Figura 14	– Exemplos de gráficos de dispersão NDVI/Ts – 2014 e 2020	41
Figura 15	– TVDI de 2014 a 2020 para o NEB	45
Figura 16	– Comparação entre o TVDI e Umidade do Solo (ascendente/descendente), maio de 2015	48
Figura 17	– Comparação entre o TVDI e Umidade do Solo (ascendente/descendente), setembro de 2015	49
Figura 18	– Comparação entre o TVDI e Umidade do Solo (ascendente/descendente), maio de 2016	50

Figura 19	– Comparação entre o TVDI e Umidade do Solo (ascendente/descendente), setembro de 2016	51
Figura 20	– Comparação entre o TVDI e Umidade do Solo (ascendente/descendente), maio de 2017	52
Figura 21	– Comparação entre o TVDI e Umidade do Solo (ascendente/descendente), setembro de 2017	53
Figura 22	– Comparação entre o TVDI e Umidade do Solo (ascendente/descendente), maio de 2018	54
Figura 23	– Comparação entre o TVDI e Umidade do Solo (ascendente/descendente), setembro de 2018	55
Figura 24	– Comparação entre o TVDI e Umidade do Solo (ascendente/descendente), maio de 2019	56
Figura 25	– Comparação entre o TVDI e Umidade do Solo (ascendente/descendente), setembro de 2019	58
Figura 26	– Comparação entre o TVDI e Umidade do Solo (ascendente/descendente), maio de 2020	59
Figura 27	– Comparação entre o TVDI e Umidade do Solo (ascendente/descendente), setembro de 2020	61
Figura 28	– Média de precipitação para maio e setembro – 2014 a 2020	63
Figura 29	– Monitor vs TVDI para maio de 2014	66
Figura 30	– Monitor vs TVDI para maio de 2015	67
Figura 31	– Monitor vs TVDI para setembro de 2015	68
Figura 32	– Monitor vs TVDI para maio de 2016	68
Figura 33	– Monitor vs TVDI para setembro de 2016	69
Figura 34	– Monitor vs TVDI para maio de 2017	70
Figura 35	– Monitor vs TVDI para setembro de 2017.....	70
Figura 36	– Monitor vs TVDI para maio de 2018	71

Figura 37	– Monitor vs TVDI para setembro de 2018	71
Figura 38	– Monitor vs TVDI para maio de 2019	72
Figura 39	– Monitor vs TVDI para setembro de 2019	73
Figura 40	– Monitor vs TVDI para maio de 2020	74
Figura 41	– Monitor vs TVDI para setembro de 2020	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do produto MOD13A2	20
Tabela 2 – Características do produto MOD11A2	28
Tabela 3 – Características do Produto nível L3	29

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores da interseção “a” e o coeficiente angular “b” para os meses de maio e setembro entre 2014 e 2020	36
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Af	Clima tropical sem estação seca
ANA	Agência Nacional de Águas
Am	Clima tropical de monções
AVHRR	Advanced very-high-resolution radiometer
Aw	Clima quente com chuvas de verão e outono
BSh	Clima Semiárido quente
CATDS	Centre Aval de Traitement des Données SMOS
Cemaden	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
ESA	European Space Agency
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
FTP	File Transfer Protocol
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
GeoTIFF/.tif	Georeferenced Tagged Image File Format
HDF	Hierarchical Data Format
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LP DAAC	Land Processes Distributed Active Archive Center
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectrometer
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
netCDF/.nc	Network Common Data Form
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NEB	Nordeste Brasileiro
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity
SPI	Standard Precipitation Index
Ts	Surface Temperature
TSM	Temperatura da superfície do mar
TVDI	Temperature Vegetation Dryness Index
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo Geral	17
2.1.1	<i>Objetivos específicos</i>	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	Condição climatológica da área de estudo	18
3.2	Variabilidade Interanual e Intra-anual de precipitação no NEB	18
3.3	Vegetação do NEB	21
3.4	Conceituando os tipos de secas existentes	22
3.5	Secas no NEB	23
3.6	Monitoramento das Secas	24
3.7	TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index)	25
3.8	Satélite Terra e o sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer)	26
3.9	Umidade do solo e a missão SMOS	28
4	ÁREA DE ESTUDO	29
5	DADOS E METODOLOGIA	30
5.1	Aquisição dos dados de NDVI e Ts	30
5.2	Rotina para estimativa do TVDI	31
5.3	Aquisição e tratamento dos dados de umidade SMOS	33
5.4	Aquisição e tratamento dos dados de precipitação	34
5.5	Aquisição de dados do Monitor de Secas	35
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
6.1	Gráficos de relação NDVI/TS para cada ano	36
6.2	Imagens de TVDI	43
6.3	TVDI versus Umidade do Solo	47
6.3.1	<i>TVDI versus Umidade do Solo de 2015</i>	47
6.3.2	<i>TVDI versus Umidade do Solo de 2016</i>	50
6.3.3	<i>TVDI versus Umidade do Solo de 2017</i>	51
6.3.4	<i>TVDI versus Umidade do Solo de 2018</i>	54
6.3.5	<i>TVDI versus Umidade do Solo de 2019</i>	56

6.3.6	<i>TVDI versus Umidade do Solo de 2020</i>	59
6.4	Dados de precipitação MERGE-GPM	62
6.5	Monitor de Secas versus TVDI	65
6.5.1	<i>Monitor de Secas versus TVDI de 2014</i>	66
6.5.2	<i>Monitor de Secas versus TVDI de 2015</i>	67
6.5.3	<i>Monitor de Secas versus TVDI de 2016</i>	68
6.5.4	<i>Monitor de Secas versus TVDI de 2017</i>	69
6.5.5	<i>Monitor de Secas versus TVDI de 2018</i>	70
6.5.6	<i>Monitor de Secas versus TVDI de 2019</i>	72
6.5.7	<i>Monitor de Secas versus TVDI de 2020</i>	73
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
	REFERÊNCIAS	99
	APÊNDICE A - IMAGENS DE NDVI E TS PARA CADA ESTADO	

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno da seca, entendido como um período com déficit de precipitação, traz consigo interferência em aspectos socioeconômicos, ecológicos e relacionados à agricultura, gerando impactos negativos ao redor do mundo (DU *et al.*, 2013). Dependendo de sua intensidade, a seca pode torna-se uma catástrofe com características marcantes, pois apresenta um início lento, duração longa e tendência a espalhar-se por outras áreas, atingindo grandes extensões, enquanto outras ocorrências naturais, como furacões ou cheias, iniciam e terminam rapidamente (FREITAS, 2008).

Ademais, a ocorrência da seca traz consequências amplamente negativas para a população, implicando em perdas econômicas extremas, epidemias e degradação da terra. Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, esse fenômeno intensifica problemas estruturais, causando desemprego, empobrecimento, diminuição no rendimento de colheitas e forçando migrações em busca de melhores condições de vida (BEGUERÍA.; VICENTE-SERRANO; ANGULO-MARTÍNEZ; 2010)

A região Nordeste do Brasil (NEB) é afetada frequentemente com esta condição, possuindo registros de secas desde o século 16, ultrapassando o número de 40 ocorrências ao se considerar anos isolados e os anos seguidos com a presença desta condição (MARENGO *et al.*, 2017).

Portanto, o monitoramento deste evento extremo é essencial para o manejo correto dos recursos hídricos, visando garantir a qualidade de vida necessária às populações que convivem com a escassez. Com isso, observa-se diversas formas de acompanhamento da severidade de secas, principalmente na região do semiárido brasileiro, como o Índice de Precipitação Padronizada (SPI), utilizado por Carmo e Lima (2020), os diversos índices de seca disponíveis no site AdaptaBrasil e o desenvolvimento do aplicativo Monitor de Secas, disponível online desde 2014, permitindo uma ação preventiva em locais de maior vulnerabilidade à eventos extremos.

Uma outra forma de estimar a seca é a partir do Temperature Vegetation Dryness Index - TVDI que foi desenvolvido para estimar o estresse hídrico na vegetação e a umidade presente no solo. Este índice vem sendo usado em diversos estudos que visam investigar períodos de seca, como os de Liang *et al.* (2014), Du *et al.* (2013) e Huang *et al.* (2013). O uso do índice dentro desta abordagem foi feito inicialmente por Bezerra *et al.* (2019), para o estado do Ceará. Devido ao potencial que o TVDI demonstra como índice para observação do estresse

hídrico, este trabalho será desenvolvido para a região Nordeste abrangendo seus nove estados, no intervalo de 2014 a 2020, com foco nos meses de maio e setembro de cada ano.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a performance do TVDI na estimativa de estresse hídrico para a região Nordeste do Brasil.

2.1.1 *Objetivos específicos*

- Calcular o TVDI para a região Nordeste do Brasil durante os períodos chuvoso e seco para os meses de maio e setembro do período 2014 a 2020;
- Plotar a distribuição espacial da precipitação, oriunda do MERGE, para a região Nordeste do Brasil para os meses de maio e setembro do período 2014 a 2020;
- Comparar a distribuição espacial dos valores de TVDI com a umidade do solo estimada a partir do sensor MIRAS/SMOS;
- Comparar a distribuição espacial do Monitor de Secas com o TVDI.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

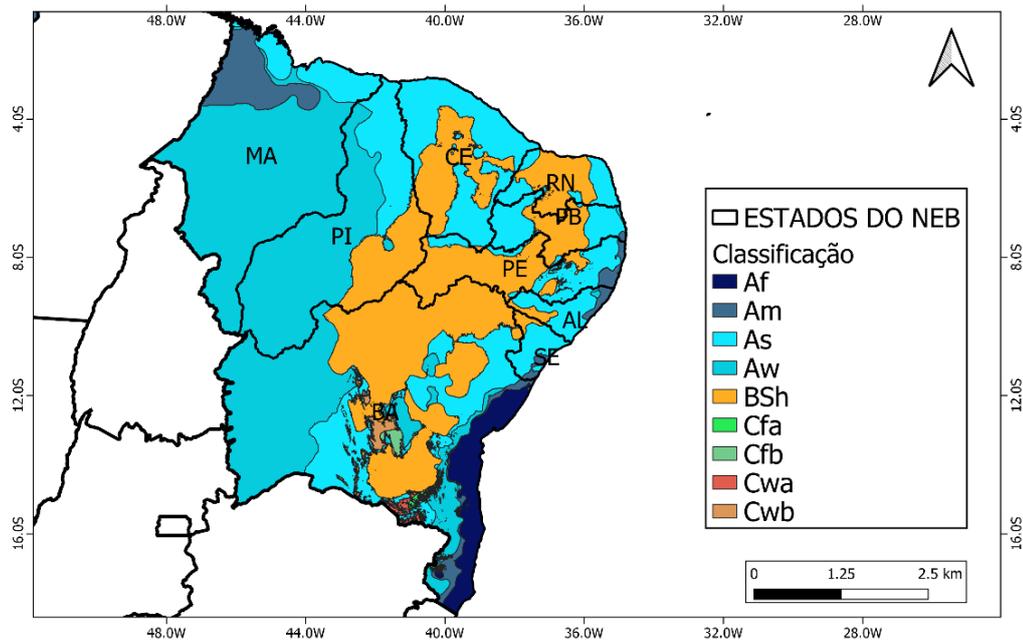
3.1 Condição climatológica da área de estudo

A região Nordeste do Brasil apresenta, segundo Alvares *et al.* (2013), dois grupos climáticos, baseados na classificação de Köppen, que se destacam em sua proporção de ocorrência ao longo dos estados, como exposto na Figura 1, sendo estes: Grupo A (Tropical), incluindo os tipos Aw (quente com chuvas de verão e outono), As (verão seco), Am (monções) e Af (sem estação seca) e Grupo B (Semiárido), com o tipo BSh (Clima quente de estepe). Há, ainda, pequenos resquícios do grupo climático C (Temperado chuvoso e moderadamente quente) ao sul-sudeste da Bahia, totalizando menos de 5% da sua área.

O clima Semiárido que se encontra na porção central da região, presente em oito de seus nove estados, é caracterizado pela alta taxa de evapotranspiração. Isto faz com que o balanço hídrico seja negativo dentro de seus limites quase o ano todo, apresentando balanço positivo apenas no período chuvoso, de fevereiro a maio (NOBRE, 2012).

Figura 1 - Classificação climática de Köppen, de acordo com Alvares *et al.* (2013).

Classificação de Köppen - Alvares et al. (2013)



Fonte: Adaptado de Alvares *et al.* (2013)

3.2 Variabilidade Interanual e Intra-anual de precipitação no NEB

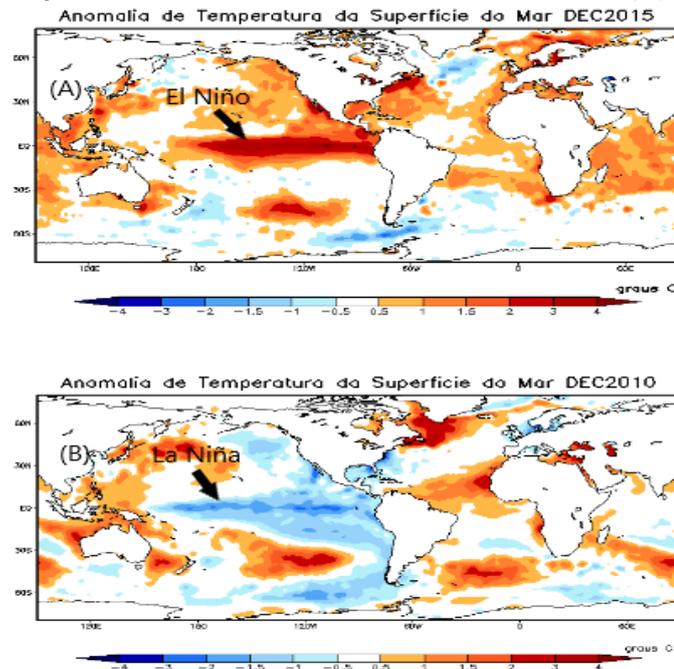
Segundo Uvo e Berndtsson (1996), há cinco mecanismos meteorológicos que podem ser considerados os principais influenciadores da precipitação na área, ao analisar a seca interanual e intra-anual, sendo estes: Eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS); Temperatura da superfície do mar (TSM), Ventos Alísios, Pressão ao Nível do Mar (PNM); Zona de Convergência Intertropical (ZCIT); Frentes Frias, e Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN). Destacam-se ainda, quatro mecanismos: a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), as Ondas de Leste, a Oscilação de Madden e Julian e as Brisas Marítimas e Terrestres (BRAGA *et al.*, 2003; FERREIRA; MELO, 2005; NOBRE, 2012).

De acordo com Ferreira e Mello (2005), os padrões termodinâmicos dos oceanos Pacífico e Atlântico têm forte influência na precipitação interanual da região nordeste, principalmente sua porção norte. As anomalias positivas e negativas da Temperatura da Superfície do Mar no oceano Pacífico (TSM), El Niño e La Niña, deslocam a posição climatológica das células de Hadley e Walker.

Em anos de El Niño, quando as águas aquecem, o fluxo de ar da célula de Walker passa a descender no Nordeste, inibindo a formação de nuvens, apresentando o favorecimento para eventos de seca como exemplifica a Figura 2, item A. Em contrapartida, nos anos em que as águas do Pacífico esfriam mais que o normal, indicativo do fenômeno La Niña, as chuvas na região tendem a ser normais ou acima da média histórica, devido ao movimento ascendente do fluxo de ar, demonstrado na Figura 2, item B (FERREIRA e MELLO, 2005).

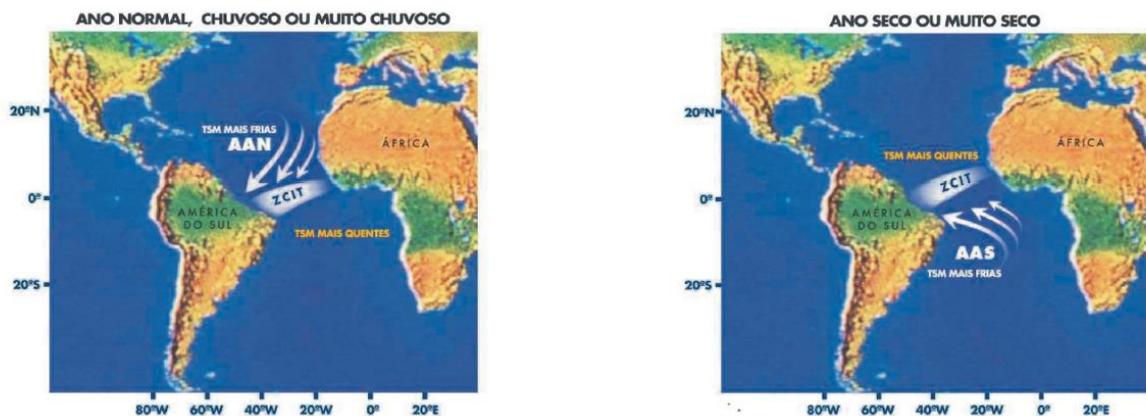
Apesar de se observar a relação entre secas no Nordeste e anos de El Niño, é preciso utilizar outros fatores em conjunto com esta anomalia ao se analisar a ocorrência das secas, pois Kane (1997) estudou 46 eventos de seca, num intervalo de 1849 a 1992 e apenas 21 desses eventos estavam ligados à anos de El Niño severo ou moderado.

Figura 2 - Exemplo de anomalias de TSM indicando El Niño (A) e La Niña (B).



As circulações atmosféricas e oceânicas do Oceano Atlântico apresentam influência sobre a região semiárida do Brasil, favorecendo anos secos/muito secos, exemplificado na Figura 3 (b) (FERREIRA; MELO, 2005). O padrão dipolo do Atlântico, apresenta o aquecimento anômalo das águas na Bacia do Atlântico Norte em relação às águas da Bacia do Atlântico Sul durante os meses de março, abril e maio, afetando a posição latitudinal da ZCIT (FERREIRA; MELO, 2005; NOBRE, 2012).

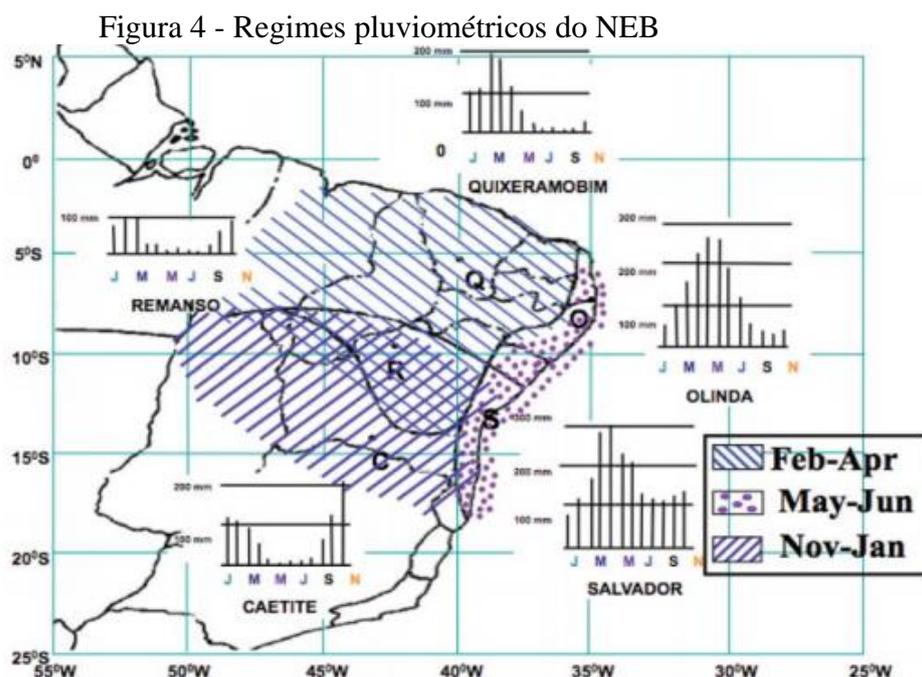
Figura 3 - Influência do Oceano Atlântico Tropical na modulação de anos com precipitação (a) normal/acima da média e (b) abaixo da média climatológica para a parte norte do NEB



Ao se considerar a variação intra-anual da precipitação (sazonalidade), encontra-se três áreas da região com a presença de, pelo menos, três regimes pluviométricos distintos, apresentando o máximo de chuva em meses diferentes, como visto na Figura 4 (KOUSKY, 1979). O primeiro regime está ligado à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), com sua estação chuvosa entre janeiro e abril, envolvendo a parte norte, principalmente o Ceará, Maranhão, Piauí, oeste do Rio Grande do Norte, da Paraíba e de Pernambuco (UVO, 1989).

O segundo regime, diz respeito à penetração de frentes frias de origem frontal oriundas de latitudes médias do Hemisfério Sul e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), com precipitação entre novembro e fevereiro, que influenciam a precipitação nos setores oeste e sul-sudeste do NEB, abrangendo o estado da Bahia, o sul do Maranhão e o Piauí ao longo de quase todo o ano (KOUSKY, 1979; BRAGA *et al.*, 2003; NOBRE, 2012).

Já o terceiro regime é caracterizado pela influência das Ondas de Leste, que segundo Ferreira e Mello (2005), se originam no campo de pressão atmosférica, na faixa tropical do globo terrestre, dentro da influência dos ventos alísios, se deslocando da costa da África ao litoral brasileiro, com a precipitação entre abril e julho. Este regime atinge a região costeira dos estados do Rio Grande do Norte, da Paraíba, do Pernambuco, de Alagoas, de Sergipe e da Bahia.



Fonte: Nobre (2012), baseado em Kousky (1980)

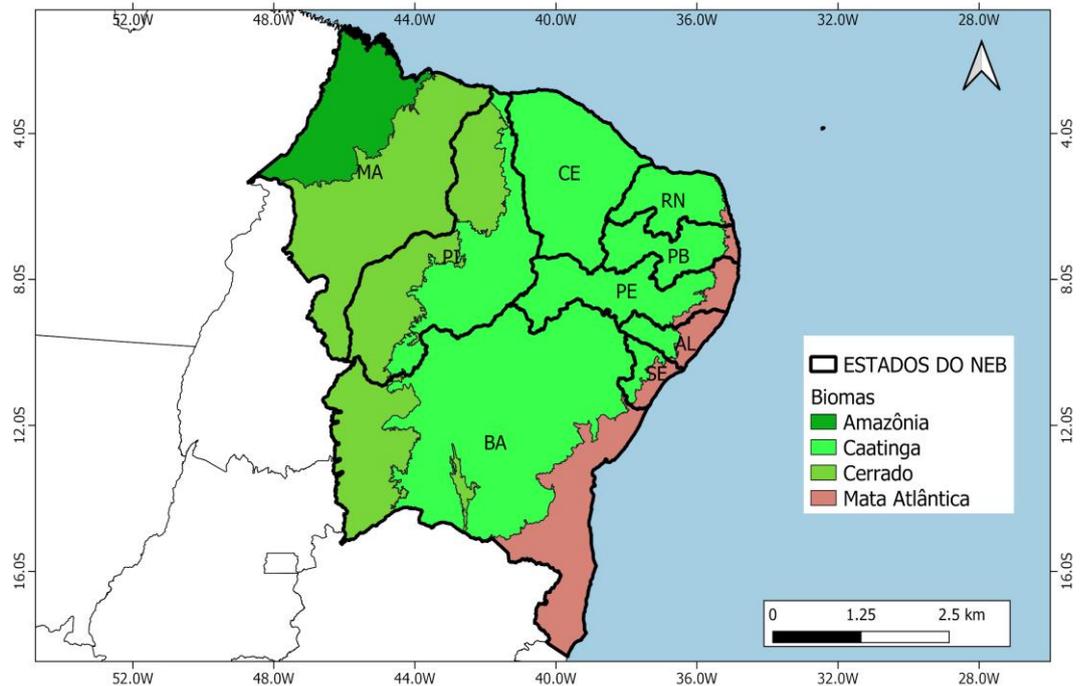
3.3 Vegetação do NEB

De acordo com o IBGE (2019), o Bioma Caatinga predomina na região, ocupando cerca de 830.205 km² da área territorial do nordeste, compreendendo oito de seus nove estados (apenas Maranhão não apresenta este tipo de vegetação), como apresentado na Figura 5. O Bioma Cerrado é o segundo maior, correspondendo à 451.710 km², sendo distribuído entre Maranhão, Piauí e Bahia. A Mata Atlântica apresenta-se com 156.030 km², com resquícios na região costeira dos estados de Rio Grande do Norte, Pernambuco, Paraíba, Alagoas, Sergipe e Bahia. Já o Bioma Amazônia está presente em 114.047 km² do estado do Maranhão.

O Bioma Caatinga, exclusivamente brasileiro, apresenta uma biodiversidade alta, contando com 1981 espécies vegetais registradas, sendo 318 espécies consideradas endêmicas (PEREIRA, 2011). Sua vegetação se caracteriza por ser adaptada à sazonalidade presente no Nordeste, fazendo com que durante o período seco a maioria das plantas percam suas folhas (caducifólias) como mecanismo para diminuir a transpiração e perda de água, sendo que no início do período chuvoso, voltam a florescer (OLIVEIRA *et al.*, 2006).

Figura 5 - Biomas do Nordeste brasileiro

Delimitação de Biomas no nordeste brasileiro



Fonte: Adaptado de IBGE (2019)

3.4 Conceituando os tipos de secas existentes

Apesar da causa base deste fenômeno ser a escassez de chuvas, de acordo com Fernandes *et al.* (2009), pode-se identificar quatro tipos de seca: meteorológica, hidrológica, agrícola e socioeconômica. A seca meteorológica ocorre devido a um desequilíbrio entre precipitação e evaporação, ao se comparar com um estado definido como normal a partir de observações feitas para determinada região (FERNANDES *et al.*, 2009).

Já a seca hidrológica é decorrente da diminuição nos níveis médios de água em reservatórios por um determinado período. Geralmente ela ocorre no fim de um tempo muito longo com seca meteorológica (FERNANDES *et al.*, 2009).

A seca agrícola ocorre ligada às duas anteriores, sendo associada a falta de água disponível no solo para o crescimento das plantações em decorrência da seca meteorológica, levando ao consumo de reservatórios de água, que em um período longo, gera mais um déficit, afetando a hidrologia (FERNANDES *et al.*, 2009).

Por último, tem-se a seca socioeconômica, que trata dos impactos diretos e indiretos acumulados ao longo do tempo, induzindo a ausência de bens e serviços para a população, como acesso à energia elétrica, alimentos e empregos. Estes quatro conceitos evidenciam como um desequilíbrio no ciclo da atmosfera pode modificar toda a estrutura do ecossistema afetado (FERNANDES *et al.*, 2009).

3.5 Secas no NEB

A variação inter e intra anual nos valores de precipitação no Nordeste, devido aos sistemas meteorológicos, causa grandes impactos na população da região que passam pela problemática da escassez hídrica, com diversas consequências sociais. Entre os impactos sofridos nas últimas décadas, encontra-se a perda de gado, falecimento da população devido à fome, doenças levadas junto com o processo de migração em direção às capitais e perdas na produção de diversos insumos agrícolas, afetando negativamente a economia da região (MARENGO *et al.*, 2013).

O histórico de crises nessa região é documentado por várias fontes e Marengo *et al.* (2017) sintetizou os seguintes períodos: 1583, 1603, 1624, 1692, 1711, 1720, 1723-1724, 1744-1746, 1754, 1760, 1772, 1766-1767, 1777-1780, 1784, 1790-1794, 1804, 1809, 1810, 1816- 1817, 1824-1825, 1827, 1830-1833, 1845, 1877-1879, 1888-1889, 1891, 1898, 1900, 1902-1903, 1907, 1915, 1919, 1932-1933, 1936, 1941-1944, 1951- 53, 1958, 1966, 1970, 1976,

1979-1981, 1982-1983, 1992-1993, 1997-1998, 2001-2002, 2005, 2007, 2010 e 2012-2016. Destaca-se que Cunha *et al.* (2019) apresentam o último período de secas no intervalo 2011-2019, e segundo os autores, a seca entre o final de 2011 e 2017 foi a mais intensa dos últimos 30 anos.

Segundo Martins (2015), o monitoramento de secas de forma aprimorada e objetiva pode permitir melhorias na gestão racional de recursos hídricos para os diversos usos necessários ao ser humano, auxiliando para uma futura mudança na região do NEB, ao substituir a Gestão de Crise por uma Gestão de Risco ligada ao fenômeno estudado, amenizando assim, seus impactos.

3.6 Monitoramento das secas

O monitoramento deste fenômeno pode ser feito a partir de índices que indiquem longos períodos de estiagem, como o Índice de Precipitação Padronizado (SPI), que indica a seca meteorológica, desenvolvido a partir de dados mensais de precipitação. Este índice permite calcular o excesso ou déficit da precipitação em um determinado período de tempo, sendo ideal o uso de dados num período de pelo menos 30 anos (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993).

Atualmente, há iniciativas nacionais e estaduais para monitoramento dos impactos de secas, a exemplo do CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais) que divulga dados à nível nacional, com o Índice Integrado de Secas (IIS), que é feito a partir da combinação do SPI, Índice de Suprimento de Água para Vegetação (VSWI) ou o Índice de Saúde da Vegetação e a umidade do solo (CEMADEN, 2021). O MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações) por meio do site AdaptaBrasil MCTI, é responsável pela exposição de Índices como o Índice de Impacto para a Seca e o Índice de Sensibilidade para a Seca nos municípios do Semiárido (MCTI, 2021).

Outra forma de analisar a severidade de secas físicas de forma integrada, no caso do semiárido brasileiro, ocorre por meio da plataforma Monitor de Secas, desenvolvida com parcerias estaduais, nacionais e internacionais. Este produto é gerado a partir da junção de uma série de dados, como: o Índice de Precipitação Padronizado (SPI), o Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) e o SPI-MERGE, ambos considerados a curto e longo prazo (ANA, 2019).

Como dados auxiliares, utilizam o Índice de Saúde da Vegetação (VHI), climatologia da precipitação, precipitação observada, anomalia de precipitação dos meses e outros dados necessários para meses específicos. Também consideram as condições observadas

um mês antes para identificar as áreas mais críticas que serão consideradas como expansão da seca e as áreas com sua redução, ao analisar o panorama com todas as variáveis (ANA, 2019).

Com este aplicativo, é possível o acompanhamento frequente da seca (desde agosto de 2014), gerando produtos visuais no formato de imagens .jpg e arquivos vetoriais, próprios para Sistemas de Informação Geográfica (SIG), disponíveis para download. Com essas informações, é possível acompanhar o fenômeno, demonstrando o impacto temporal do mesmo (curto e longo prazo), para que gestores possam se articular de forma preventiva, minimizando os efeitos de eventos extremos, tanto para a área agrícola, quanto para a sociedade em geral (ANA, 2020). Para este estudo, serão utilizados os dados do Monitor de Secas.

3.7 TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index)

O TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) foi desenvolvido por Sandholt, Rasmussen e Andersen (2002) para estimar o estresse hídrico na vegetação e a umidade do solo, baseando-se na relação entre o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e a T_s (Surface Temperature), tendo como resultado valores entre 0 (condição úmida) e 1 (condição seca). Para o cálculo deste índice, é necessário utilizar áreas de estudo que ofereçam variabilidade nas condições do solo, com amostras de solo exposto seco, úmido, locais com vegetação em estresse hídrico e em condições ideais de desenvolvimento (SANDHOLT, RASMUSSEN; ANDERSEN, 2002)

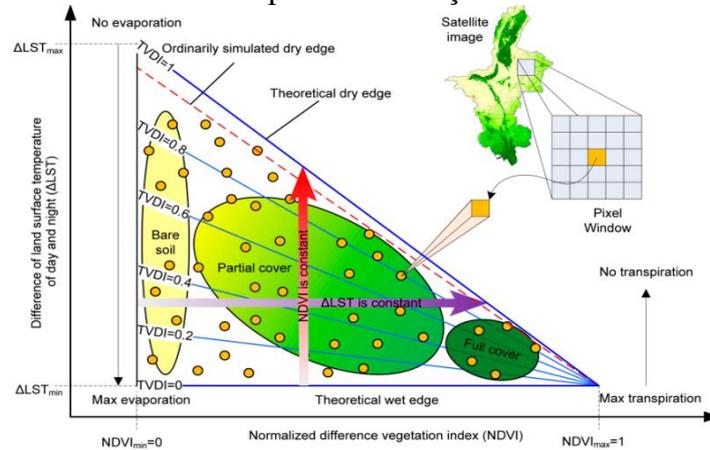
O NDVI é um índice clássico, usado para indicar a distribuição vegetacional e seu estado (seca/verde), variando de -1 a 1, onde os valores mais baixos são associados à vegetação passando por estresse, e valores altos - perto de 1 - indicam vegetação sadia. Entretanto, não apresenta sucesso para estimar a quantidade de água no solo, devido à sua característica de saturação em regiões com alta cobertura vegetacional (HUETE *et al.*, 2002).

Já a T_s é mais sensível ao estresse hídrico, devido sua relação com a transpiração da vegetação e a umidade do solo. Quando as folhas transpiram, a água liberada para a atmosfera ajuda a resfriá-las junto com a superfície. A partir do momento que a região passa por um déficit de água no solo, as folhas passam por um decréscimo na transpiração, fazendo com que sua temperatura se eleve (WANG *et al.*, 2004).

Com esta relação definida, se observa na Figura 6, um exemplo de gráfico de dispersão com a distribuição de valores do TVDI. O lado úmido do triângulo é uma linha paralela ao NDVI, com temperaturas mais amenas, atingindo valores próximos a 0, tendo

condições ótimas de evapotranspiração. Já o lado seco apresenta temperaturas altas enquanto os valores de NDVI decrescem, chegando a 1 (WANG *et al.*, 2004).

Figura 6 - Gráfico de dispersão da relação NDVI/Ts



Fonte: Du *et al.* (2017)

A equação para estimar o TVDI será a mesma utilizada por Meng *et al.* (2010), determinando os valores dos pixels entre os lados seco e úmido, de acordo com a distância de cada pixel do lado úmido.

$$Ts - max = a + b \times NDVI$$

$$Ts - min = a' + b' \times NDVI$$

$$TVDI = \frac{[Ts - (a' + b' \times NDVI)]}{[(a + b \times NDVI) - (a' + b' \times NDVI)]}$$

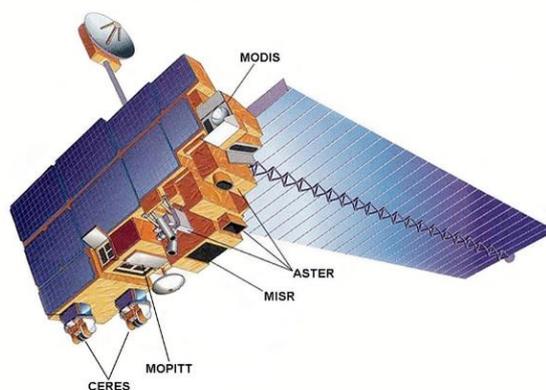
onde a e b são, respectivamente, a interceptação e o coeficiente angular da reta do lado “seco”, enquanto a’ e b’, são a interceptação e o coeficiente angular do lado “úmido”. Ts, Ts-max e Ts-min são a Temperatura da superfície, Temperatura da superfície máxima e mínima, respectivamente.

3.8 Satélite Terra e o sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer)

O sensor MODIS está presente nos satélites Terra e Aqua, da National Aeronautics and Space Administration (NASA). Neste trabalho, serão usados os dados adquiridos pelo satélite Terra (Figura 7), que orbita a Terra a uma altitude de 705 km. O sensor MODIS apresenta um campo de visada ampla, de 2330 km, possibilitando que sua resolução temporal seja alta, em torno de 1 a 2 dias. Sua resolução espectral favorece diversos estudos sobre a

superfície terrestre, o oceano e a atmosfera, com 36 bandas espectrais bem definidas e sua resolução radiométrica que apresenta alta sensibilidade (12 bits). A resolução espacial varia entre 250 m a 1 km (NASA, 2020).

Figura 7 – Satélite Terra e seus sensores



Fonte: NASA (2017)

A partir das imagens MODIS, são gerados produtos voltados à superfície (Land Products) como o NDVI, EVI, a Ts, evapotranspiração, entre outros. Neste trabalho, serão usados os conjuntos de dados referentes ao NDVI (MOD13A2) e Ts (MOD11A2) na versão mais recente (v006), ambos com resolução espacial de 1 km, no formato HDF (Hierarchical Data Format). Suas especificações estão dispostas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Características do produto MOD13A2

Camadas do produto (HDF)	Unidade	Faixa Válida	Fator de escala
1 km 16 days NDVI	NDVI	-2000 - 10000	0.0001
1 km 16 days EVI	EVI	-2000 - 10000	0.0001
1 km 16 days VI Quality	Bits	0 - 65534	N/A
1 km 16 days red reflectance	N/A	0 - 10000	0.0001
1 km 16 days NIR reflectance	N/A	0 - 10000	0.0001
1 km 16 days blue reflectance	N/A	0 - 10000	0.0001
1 km 16 days MIR reflectance	N/A	0 - 10000	0.0001
1 km 16 days view zenith angle	Graus	0 - 18000	0.01
1 km 16 days sun zenith angle	Graus	0 - 18000	0.01
1 km 16 days relative azimuth angle	Graus	-18000 - 18000	0.01

1 km 16 days composite day of the year	Dia Juliano	1 - 366	N/A
1 km 16 days pixel reliability	Rank	0 - 4	N/A

Fonte: Adaptado de Didan (2015).

Tabela 2 - Características do produto MOD11A2

Camadas do produto (HDF)	Unidade	Faixa Válida	Fator de escala
LST_Day_1km	Kelvin	7500 - 65535	0.02
QC_Day	Bits	0 to 255	N/A
Day_view_time	Horas	0 to 240	0.1
Day_view_angl	Graus	0 to 130	N/A
LST_Night_1km	Kelvin	7500 - 65535	0.02
QC_Night	Bits	0 to 255	N/A
Night_view_time	Horas	0 to 240	0.1
Night_view_angl	Graus	0 to 130	N/A
Emis_31	N/A	1 to 255	0.002
Emis_32	N/A	1 to 255	0.002
Clear_sky_days	Bits	1 to 255	N/A
Clear_sky_nights	Bits	1 to 255	N/A

Fonte: Adaptado de Wan (2013).

3.9 Umidade do solo e a missão SMOS

A missão Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS), mostrada na Figura 8, da Agência Espacial Europeia - European Space Agency (ESA), disponibiliza produtos relacionados à umidade do solo, salinidade do oceano, espessura do gelo e parâmetros como a velocidade do vento sobre o oceano desde novembro de 2009. As medições são feitas a partir do sensor passivo Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis (MIRAS), que capta microondas na banda L, com frequência de 1.4GHz. A umidade do solo global é estimada para as camadas superficiais, a cerca de 5 cm de profundidade (ESA, 2020).

Figura 8 – Satélite SMOS



Fonte: ESA (2020)

O satélite possui duas órbitas, uma ascendente e uma descendente, passando pelo Equador, respectivamente, às 06:00 e 18:00 horas (Local Time). Apresenta resolução temporal de 1 dia, com produtos de composição nos períodos de 3 e 9 dias, além de possibilitar o uso de dados mensais e anuais. Sua resolução espacial gira em torno de 43 km, podendo chegar a 1 km dependendo do nível de processamento, distribuídos em 3 categorias: L2, L3 e L4. Os dois primeiros níveis concentram-se em resoluções de 15 a 25 km, enquanto o último é refinado à 1 km. Para acessar os níveis L3 e L4, se utiliza o site francês Centre Aval de Traitement des Données SMOS (CATDS), que possibilita o download de arquivos via FTP (File Transfer Protocol) ou pedidos específicos. As características do produto com nível L3 de tratamento estão discriminadas na Figura 3 (KERR, 2010; SMOS-BEC, 2020).

Tabela 3 – Características do Produto nível L3

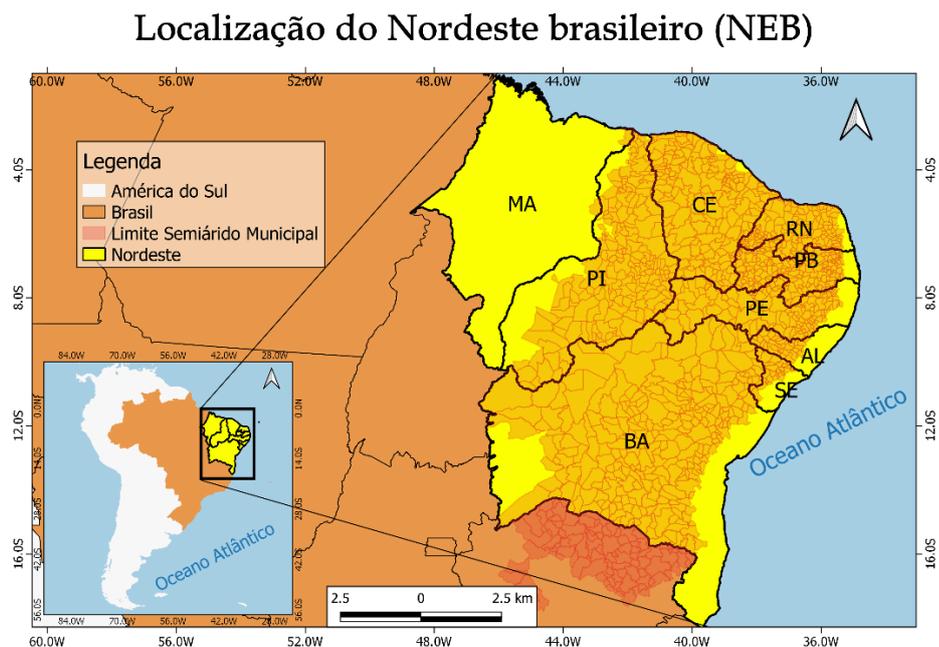
Variáveis do produto (netCDF)	Unidade
Nb_Sm	Count
Soil_Moisture	m ³ .m ⁻³
Soil_Moisture_Dqx	m ³ .m ⁻³
Var_Soil_Moisture	m ³ .m ⁻³
Optical_Thickness_Lv	N/A
Optical_Thickness_Lv_Dqx	N/A
Var_Optical_Thickness_Lv	N/A
Nominal_Fraction	%
Forest_Fraction	N/A
Gqx	N/A
Rfi_X_Frac	N/A
Rfi_Y_Frac	N/A

Fonte: Elaborado pela autora.

4 ÁREA DE ESTUDO

A área, destacada na Figura 9, encontra-se no intervalo de latitudes de 01°02'30"S a 18°20'07"S e longitudes de 34°47'30"W a 48°45'24"W (IBGE, 2017). É constituída por 9 estados, sendo estes Maranhão, Piauí, Bahia, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe, ocupando uma área de 1.542.000 km², o que representa cerca de 18,2% do território nacional.

Figura 9 - Localização da área de estudo



5 DADOS E METODOLOGIA

5.1 Aquisição dos dados de NDVI e Ts

As imagens usadas são composições de 16 dias para o NDVI e 8 dias para a Ts. Estes produtos são disponibilizados através da LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center), uma parceria entre a NASA e a USGS (United States Geological Survey). Para adquirir esses produtos de forma automática, conta-se com a linguagem de programação *python*, a partir do módulo *downmodis*, disponível na biblioteca gratuita *pymodis*. O download é realizado via FTP (File Transfer Protocol).

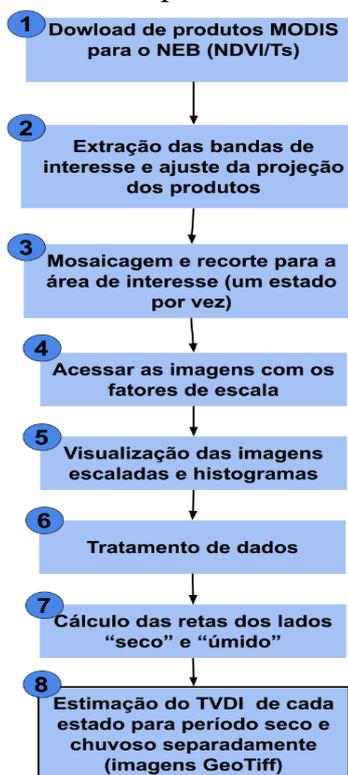
Para o download correto dos arquivos, se faz necessário definir os parâmetros requeridos pelo módulo, como: inserir credenciais do usuário (feita de forma gratuita em

<https://urs.earthdata.nasa.gov/users/new>); definir a pasta de destino; o intervalo de anos desejado compreendendo cada ano separadamente; os produtos necessários com sua correspondente versão (MOD13A2.006, MOD11A2.006) e as cenas escolhidas que abrangem a área de estudo ('h13v09','h14v09', 'h13v10','h14v10', 'h14v08'). Os períodos definidos para o estudo foram de 01 de maio a 17 de maio (2014-2020) e os dias 14 a 29 de setembro (2014-2020). As imagens adquiridas nesta rotina foram extraídas do arquivo HDF para o formato GeoTiff e reprojetaadas para o sistema de coordenadas WGS 84 (EPSG:4326) a partir da biblioteca *pyModis*, com o módulo *convertmodis_gdal*.

5.2 Rotina para estimativa do TVDI

O TVDI foi calculado de forma semiautomática, para os períodos seco e chuvoso, sendo executado a partir da linguagem *python*. O script utilizado, foi baseado no de Bezerra *et al.* (2019) que pode ser encontrado em <https://github.com/dxbezerra/TVDI>. Realizou-se algumas modificações para que o código atenda a necessidade da área maior e do período de tempo definido: 2014 a 2020. O fluxograma resumindo os processos executados nesta rotina é apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma indicando as etapas de desenvolvimento do TVDI

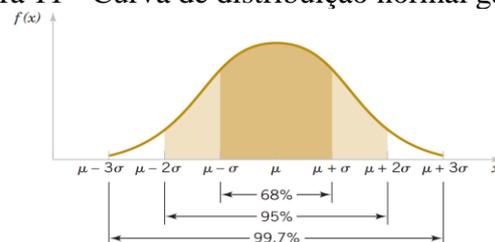


Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores das imagens inicialmente vêm em intervalos de números inteiros, não sendo compatíveis com valores das variáveis, essenciais para se desenvolver o TVDI. Por isso, utilizou-se os fatores de escala dispostos nas Tabelas 1 e 2, multiplicando as imagens por seus fatores correspondentes. Devido à diferença na composição temporal dos dados, foram utilizadas duas imagens de Ts (8 dias cada) que passaram por uma média temporal, a fim de deixar o intervalo adequado ao NDVI (16 dias).

Para uma estimativa de qualidade das retas de limites seco e úmido, fez-se a retirada de valores da Ts que fossem menores ou maiores que três vezes o desvio padrão típico dos pixels mais a média (valores errôneos = $x \pm 3\sigma$), de acordo com a curva de distribuição normal de Gauss, (PAJARON, 2010), mostrada na Figura 11. Também se desconsiderou os valores de NDVI inferiores a 0, devido à sua tendência de representar corpos d'água (MELO; SALES; OLIVEIRA, 2011). Este processo foi executado com o pacote NumPy, que suporta matrizes de informação e possibilitou a execução das contas matemáticas necessárias.

Figura 11 - Curva de distribuição normal gaussiana



Fonte: <https://www.inf.ufsc.br/~andre.zibetti/probabilidade/normal.html>

Para garantir a acurácia na estimativa dos limites, o TVDI foi desenvolvido para cada estado do Nordeste com uma rotina individual, pois a delimitação dos lados úmidos e secos depende da região escolhida e sua área, tornando-se, de certa forma, subjetivo (JUN; YUAN; DI, 2017). Ao usar o NEB inteiro, poderia gerar uma subestimação de valores, fazendo com que pixels úmidos e secos se concentrassem apenas em algumas porções de estados com valores mais extremos, como por exemplo, encontrar apenas pixels secos ao longo do Ceará, pois os úmidos estariam marcados na porção amazônica do Maranhão.

Ressalta-se que os estados da região se encontram inseridos em regimes diferentes de chuvas além de biomas distintos. Dessa forma, ao calcular o TVDI individualmente, se está considerando suas particularidades e valores a serem encontrados, cobrindo todos os tipos de solo disponíveis dentro da delimitação de cada um, possibilitando uma estimativa de retas com maior qualidade.

Para o cálculo das retas para os lados seco e úmido do triângulo evaporativo, inicialmente se identificaram as temperaturas correspondentes a pixels específicos de NDVI, estabelecendo as temperaturas máximas e mínimas relacionadas aos mesmos.

Em seguida, os coeficientes a e b foram calculados através de regressão linear, usando a função *polyfit* do pacote gratuito NumPy e plotados em um gráfico de dispersão. Após a identificação dos limiares e dos valores distribuídos dentro do gráfico, se aplica a Equação 3 para estimar o TVDI, gerando o produto final, com imagens dos estados do NEB nos formatos Geotiff. Os valores de TVDI das imagens foram divididos em 5 intervalos de 0.2, assim como no estudo de Wang *et al.* (2004): 0.0-0.2 (muito úmido); 0.2-0.4 (úmido); 0.4-0.6 (balanceado); 0.6-0.8 (seco) e 0.8-1.0 (muito seco).

5.3 Aquisição e tratamento dos dados de umidade SMOS

As imagens de umidade do solo mensais, com nível de processamento 3 (L3), foram disponibilizadas pelo Centre Aval de Traitement des Données SMOS (CATDS), com resolução espacial de 25 quilômetros, entre os anos de 2015 e 2020. Os arquivos em formato netCDF (Network Common Data Form), foram convertidos para Geotiff, para possibilitar uma visualização adequada dos dados no QGIS, conforme etapas de processamento indicadas na Figura 12. Após conversão, os pixels passaram a ter resolução espacial de aproximadamente 100 quilômetros.

Figura 12 – Fluxograma de manipulação dos arquivos de umidade



Fonte: Elaborado pela autora.

Para a conversão dos dados, primeiro utilizou-se a função *gdal_translate* para fazer com que houvesse a leitura correta das coordenadas, pois não apresentam a distância entre latitude e longitude constante, gerando distorções espaciais. Com a função, se estabeleceu a projeção e os valores máximos das bordas, com coordenadas correspondentes a escala global, tendo como resultado um netCDF em formato virtual.

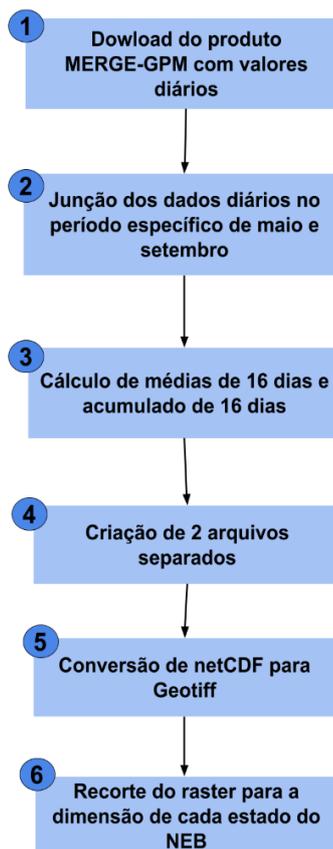
O arquivo em formato virtual foi importado dentro do QGIS e, em seguida, foi transformado em GeoTiff com a funcionalidade “*Converter formato*”, acessada por meio do menu *Raster*. Ao final do processo, os arquivos das órbitas ascendente e descendente foram dispostos em mapas, junto com o TVDI para possibilitar sua comparação.

5.4 Aquisição e tratamento dos dados de precipitação

Os dados de precipitação diária para o intervalo de 2014 a 2020, foram disponibilizados pela FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos), em formato netCDF (Network Common Data Form), formato comum para armazenamento de informações meteorológicas e, posteriormente, em Geotiff. Estes arquivos são do produto MERGE, gerado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), utilizando o Global Precipitation Measurement (GPM) (ROZANTE, 2020), com resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

A partir dos dados diários, técnicos da FUNCEME, executaram um script na linguagem *python*, para calcular médias de 16 dias nos meses de maio e setembro de cada ano, correspondendo ao período do TVDI e o acumulado de 16 dias, atribuindo o Sistema de Coordenadas como WGS 84. A resolução espacial do produto recebido foi $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, correspondendo a aproximadamente 44 km. Posteriormente, foi feita a conversão dos produtos gerados para o formato GeoTiff, como exemplifica a Figura 13, nos passos 1 a 5. A conversão foi feita por meio da função *gdal_translate*. Após o recebimento dos dados em .tif, estes foram recortados com a extensão de cada estado do Nordeste, utilizando a função *gdal.Warp*. Estes dados foram utilizados como forma de ilustrar a situação dos estados com relação à chuva no período coincidente com o TVDI.

Figura 13 - Fluxograma de manipulação dos arquivos de precipitação



Fonte: Elaborado pela autora

5.5 Aquisição de dados do Monitor de Secas

Os shapefiles e informações complementares acerca do desenvolvimento do produto de seca física estão disponíveis no site do Monitor de Secas (<http://monitordesecas.ana.gov.br/mapa?mes=11&ano=2020>) que dá acesso aos dados em forma tabular, de imagens ou compatíveis com SIG separados para cada mês do ano.

Os shapefiles com a extensão de todo o semiárido (a depender do ano), foram recortados para ficar com tamanho compatível ao Nordeste. Foram utilizadas cores similares as do aplicativo, que traz seis classes: Sem Seca Relativa, S0 Seca Fraca, S1 Seca Moderada, S2 Seca Grave, S3 Seca Extrema e S4 Seca Excepcional, com valores de identificação que variam de 0 a 6 em sua tabela de atributos. Estes dados foram usados para uma comparação qualitativa. Além destes produtos de severidade da seca, foram baixados arquivos em PDF que contém análises das condições de cada mês escolhido.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Gráficos de relação NDVI/TS para cada ano

Os valores estimados para a interseção (a) e o coeficiente angular (b), para os lados seco e úmido do triângulo evaporativo formado nos gráficos de dispersão, estão dispostos no Quadro 1. No mês de maio, os valores de temperatura (interseção) e do coeficiente angular “b” para o lado seco, apresentaram valores com intervalos de 306,1 K a 326,5 K e -24,9 a -2,2, respectivamente, enquanto os valores de setembro abrangem valores de 304,8 K a 338,0 K e -34 e -3,1.

Para todos os Estados, ao longo dos anos, percebe-se que os valores de “b” (seco) são maiores durante o período úmido (maio) em comparação com o período seco (setembro), mostrando uma inclinação mais acentuada em setembro, como mostra o Quadro 1 e a Figura 14. Holzman, Rivas e Piccolo (2014), apontaram que a precipitação em grande quantidade pode interferir na estimação da reta para o lado seco em climas úmidos, por apresentar menor chance de encontrar pixels realmente secos e identificar menor variação entre as temperaturas máximas, o que faz com que a inclinação da reta seja diminuída. Isso indica que o lado seco é estimado de forma mais precisa durante períodos com pouca/nenhuma chuva.

Já para o lado úmido, assume-se que este será como uma reta paralela ao NDVI (SANDHOLT, RASMUSSEN, ANDERSEN; 2002). Os resultados obtidos neste estudo foram dentro do esperado, com a maioria dos estados apresentando seu coeficiente angular baixo, com exceção apenas para o Ceará, em maio de 2014, que apresentou uma inclinação maior (-8,4). Os valores de temperatura mínimos e coeficiente angular ‘b’ do lado úmido para maio variaram de 284,4 K a 304,1 K e -8,4 a -0,1, enquanto o mês de setembro teve intervalos de 291,0 K a 305,3 K e -6,6 a -0,1.

Quadro 1 – Valores da interseção “a” e o coeficiente angular “b” para os meses de maio e setembro entre 2014 e 2020

ALAGOAS				
Mês/Ano	a (interceptação)		b (coef. angular)	
	L. seco	L. úmido	L. seco	L. úmido
Maio 2014	305,7 K	295,0 K	-2,6	-0,8
Maio 2015	320,7 K	299,2 K	-18,4	-1,7
Maio 2016	320,3 K	298,4 K	-18,8	-3,6
Maio 2017	324,7 K	304,1 K	-21,1	-6,8
Maio 2018	316,7 K	299,2 K	-14,1	-2,7
Maio 2019	318,8 K	300,0 K	-16,2	-4,4
Maio 2020	306,1 K	296,2 K	-2,6	-2,9
Set 2014	316,9 K	298,1 K	-14,0	-2,1
Set 2015	323,7 K	296,7 K	-21,2	-0,8
Set 2016	330,4 K	300,8 K	-31,1	-2,1
Set 2017	309,4 K	291,5 K	-8,3	-0,9
Set 2018	325,2 K	296,8 K	-25,5	-0,5
Set 2019	321,3 K	297,5 K	-18,7	-0,3
Set 2020	320,8 K	301,4 K	-19,0	-6,0

BAHIA				
Mês/Ano	a (interceptação)		b (coef. angular)	
	L. seco	L. úmido	L. seco	L. úmido
Maio 2014	324,3 K	291,4 K	-19,9	-0,8
Maio 2015	323,6 K	284,4 K	-18,7	-2,4
Maio 2016	320,5 K	290,7 K	-16,2	-0,8
Maio 2017	321,8 K	297,5 K	-17,1	-4,0
Maio 2018	319,5 K	292,7 K	-14,8	-1,6
Maio 2019	319,0 K	290,7 K	-15,3	-1,9
Maio 2020	317,5 K	284,1 K	-15,7	-6,0
Set 2014	331,3 K	291,5 K	-27,8	-2,0
Set 2015	334,1 K	295,2 K	-29,7	-0,5
Set 2016	328,5 K	293,2 K	-19,8	-0,4
Set 2017	329,3 K	285,5 K	-27,6	-4,7
Set 2018	330,3 K	295,3 K	-25,7	-0,3
Set 2019	333,6 K	291,0 K	-30,8	-3,0
Set 2020	335,6 K	294,6 K	-33,3	-1,0

CEARÁ				
Mês/Ano	a (interceptação)		b (coef. angular)	
	L. seco	L. úmido	L. seco	L. úmido
Maio 2014	314,2 K	293,0 K	-7,8	-8,4
Maio 2015	319,2 K	295,0 K	-15,3	-2,2
Maio 2016	322,0 K	298,7 L	-18,2	-4,5
Maio 2017	326,5 K	299,6 K	-24,9	-2,7
Maio 2018	310,6 K	294,6 K	-5,7	-4,0
Maio 2019	311,6 K	293,6 K	-7,0	-2,4
Maio 2020	310,1 K	292,6 K	-4,2	-0,4
Set 2014	327, 3 K	302,7 K	-25,8	-4,7
Set 2015	328,3 K	302,8 K	-26,5	-5,1
Set 2016	329,7 K	305,3 K	-29,1	-6,4
Set 2017	326,6 K	305,1 K	-24,5	-6,6
Set 2018	327,0 K	302,9 K	-26,1	-4,3
Set 2019	326,8 K	301,8 K	-24,9	-3,4
Set 2020	325,3 K	303,3 K	-22,8	-4,6

MARANHÃO				
Mês/Ano	a (interceptação)		b (coef. angular)	
	L. seco	L. úmido	L. seco	L. úmido
Maio 2014	316,8 K	288,1 K	-11,0	-0,9
Maio 2015	312,9 K	295,7 K	-7,9	-6,9
Maio 2016	318,9 K	294,1 K	-13,6	-0,9
Maio 2017	317,3 K	292,5 K	-12,6	-1,4
Maio 2018	319,1 K	291,6 K	-13,3	-6,6
Maio 2019	314,7 K	288,6 K	-8,4	-0,5
Maio 2020	315,6 K	292,0 K	-10,2	-1,3
Set 2014	333,3 K	295, 4 K	-29,1	-2,3
Set 2015	331,2 K	294,4 K	-24,5	-3,2
Set 2016	331,6 K	298,1 K	-24,8	-1,8
Set 2017	329,0 K	295,8 K	-21,3	-1,4
Set 2018	332,3 K	295,8 K	-27,0	-0,2
Set 2019	332,1 K	295,7 K	-25,7	-2,1
Set 2020	333,1 K	296,8 K	-26,4	-0,3

PARAÍBA				
Mês/Ano	a (interceptação)		b (coef. angular)	
	L. seco	L. úmido	L. seco	L. úmido
Maio 2014	318,1 K	296,7 K	-15,4	-2,3
Maio 2015	321,5 K	301,8 K	-18,8	-3,3
Maio 2016	322,7 K	299,8K	-21,1	-2,3
Maio 2017	317,9 K	302,6 K	-14,8	-4,7
Maio 2018	310,4 K	294,7 K	-6,2	-2,5
Maio 2019	319,9 K	299,4 K	-16,1	-5,8
Maio 2020	310,7 K	296,2 K	-3,1	-1,1
Set 2014	324,9 K	299,6 K	-23,2	-2,1
Set 2015	326,8 K	301,3 K	-24,4	-2,8
Set 2016	326,9 K	302,6 K	-24,5	-1,5
Set 2017	327,8 K	298,5 K	-29,2	-1,5
Set 2018	325,6 K	298,7 K	-26,3	-0,1
Set 2019	327,2 K	298,1 K	-27,0	-1,0
Set 2020	323,9 K	302,3 K	-21,6	-2,5

PERNAMBUCO				
Mês/Ano	a (interceptação)		b (coef. angular)	
	L. seco	L. úmido	L. seco	L. úmido
Maio 2014	313,2 K	295,1 K	-10,4	-2,3
Maio 2015	320,7 K	298,6 K	-17,8	-1,5
Maio 2016	320,9 K	298,1 K	-20,6	-2,1
Maio 2017	323,4 K	299,5 K	-21,5	-2,9
Maio 2018	315,6 K	297,4 K	-12,7	-4,6
Maio 2019	320,5 K	295,3 K	-17,2	-1,9
Maio 2020	311,9 K	294,6 K	-7,9	-2,8
Set 2014	324,1 K	297,2 K	-23,5	-1,0
Set 2015	325,2 K	298,6 K	-22,7	-1,5
Set 2016	327,3 K	298,9 K	-26,5	-0,6
Set 2017	323,1 K	293,4 K	-22,9	-1,2
Set 2018	324,4 K	294,3 K	-24,6	-2,0
Set 2019	326,3 K	296,5 K	-26,2	-0,7
Set 2020	322,1 K	298,5 K	-20,2	-2,2

PIAUI				
Mês/Ano	a (interceptação)		b (coef. angular)	
	L. seco	L. úmido	L. seco	L. úmido
Maio 2014	321,7 K	297,6 K	-17,8	-2,9
Maio 2015	316,2 K	300,4 K	-10,1	-4,5
Maio 2016	323,1 K	300,4 K	-18,2	-2,3
Maio 2017	322,3 K	301,7 K	-17,8	-5,4
Maio 2018	321,4 K	301,9 K	-16,5	-6,6
Maio 2019	319,1 K	295,7 K	-14,3	-1,2
Maio 2020	317,5 K	300,2 K	-11,6	-5,9
Set 2014	335,6 K	304,0 K	-34,8	-1,6
Set 2015	338,0 K	304,1 K	-34,1	-0,1
Set 2016	332,4 K	302,7 K	-26,1	-1,1
Set 2017	330,5 K	303,7 K	-27,1	-1,1
Set 2018	333,6 K	302,5 K	-29,0	-0,7
Set 2019	332,6 K	303,6 K	-29,0	-1,7
Set 2020	334,4 K	303,7 K	-30,9	-0,7

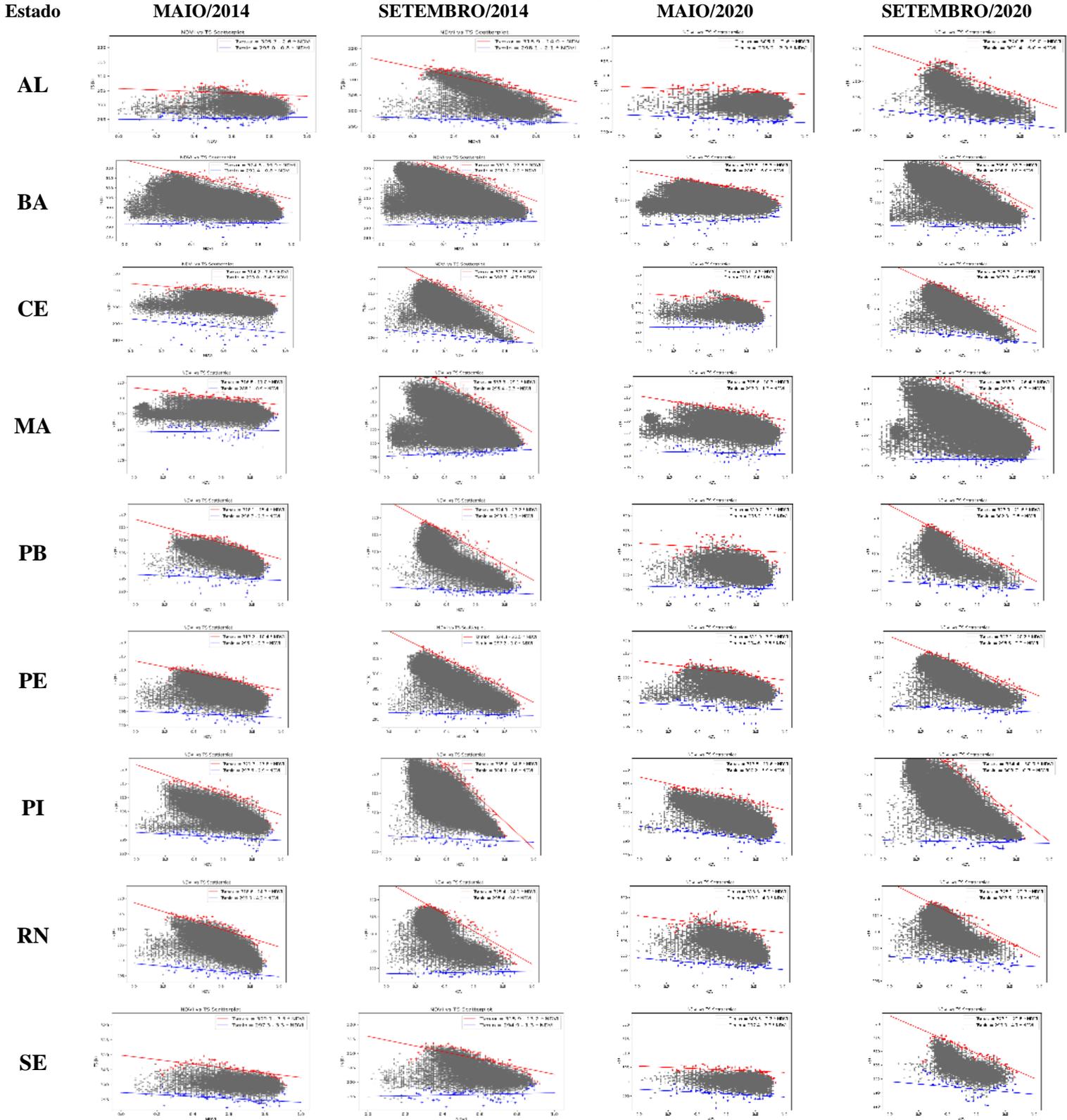
RIO GRANDE DO NORTE				
Mês/Ano	a (interceptação)		b (coef. angular)	
	L. seco	L. úmido	L. seco	L. úmido
Maio 2014	318,6 K	299,0 K	-14,3	-4,2
Maio 2015	317,1 K	302,4 K	-11,6	-2,6
Maio 2016	323,9 K	300,8 K	-21,2	-2,7
Maio 2017	315,6 K	302,2 K	-9,3	-3,5
Maio 2018	311,1 K	295,6 K	-7,1	-4,0
Maio 2019	311,6 K	300,8 K	-5,2	-6,1
Maio 2020	313,8 K	299,2 K	-5,9	-4,0
Set 2014	325,4 K	298,4 K	-24,1	-0,8
Set 2015	328,4 K	303,0 K	-27,9	-3,9
Set 2016	330,5 K	304,5 K	-31,7	-4,3
Set 2017	326,5 K	302,2 K	-24,9	-2,7
Set 2018	324,1 K	299,8 K	-22,8	-1,0
Set 2019	325,9 K	301,4 K	-25,3	-2,6
Set 2020	325,1 K	302,5 K	-22,7	-3,1

SERGIPE				
Mês/Ano	a (interceptação)		b (coef. angular)	
	L. seco	L. úmido	L. seco	L. úmido
Maio 2014	309,9 K	297,3 K	-7,5	-3,3
Maio 2015	322,0 K	295,2 K	-20,1	-0,1
Maio 2016	316,8 K	296,8 K	-14,8	-0,8
Maio 2017	320,6 K	304,3 K	-16,0	-7,4
Maio 2018	318,5 K	297,4 K	-16,8	-1,8
Maio 2019	315,8 K	299,7 K	-12,5	-3,3
Maio 2020	305,5 K	297,4 K	-2,2	-2,7
Set 2014	315,9 K	294,9 K	-13,2	-1,3
Set 2015	324,5 K	298,1 K	-23,4	-0,8
Set 2016	330,6 K	299,7 K	-30,6	-0,7
Set 2017	304,8 K	291,8 K	-3,1	-1,0
Set 2018	322,0 K	298,6 K	-20,3	-0,3
Set 2019	316,6 K	299,0 K	-13,4	-2,7
Set 2020	323,1 K	299,0 K	-22,8	-4,7

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 14 mostra exemplos dos gráficos de dispersão, como citado anteriormente, com as linhas do lado seco em vermelho e úmido em azul, apenas para os anos 2014 e 2020. É possível observar a semelhança nos gráficos dos dois anos. Os dados de setembro se assemelham mais ao formato de triângulo, devido à maior inclinação do lado seco (vermelho).

Figura 14 – Exemplos de gráficos de dispersão NDVI/Ts – 2014 e 2020



Fonte: Elaborado pela autora.

6.2 Imagens de TVDI

As imagens de TVDI geradas para os anos de 2014 a 2020, com resolução de 1 quilômetro e sua legenda de valores estão dispostas na Figura 15. Quanto mais perto de zero (preto/roxo), o pixel indicará maior umidade, quanto mais perto de um (laranja/amarelo) prevalecem condições mais secas.

As regiões em branco indicam locais sem valor atribuído, como os indicativos de nuvens, pois o dado de Ts é disponibilizado com a retirada de pixels contaminados por nuvens e os indicativos de água no NDVI (inferiores a zero), retirados na etapa de tratamento de dados. Através dos anos, se percebe a presença de nuvens, principalmente no Maranhão e na Bahia. Destaca-se que ao norte do Maranhão, há a presença de diversas Baías, como a de São Marcos que aparece mais preponderante, por isso esta região manteve-se branca em todas as imagens. Na Bahia, o Lago de Sobradinho e a Baía de Todos os Santos também aparecem sem valores (brancos).

É possível observar que ao longo dos anos, os valores baixos estão mais concentrados na região sul-sudeste da Bahia, tanto para maio quanto setembro, com destaque para a região da Chapada Diamantina, mantendo-se constante entre 0.2-0.4 (úmido) e 0.4-0.6 (balanceado). Para maio, o ano de 2014 apresentou a maior frequência de pixels úmidos e balanceados por quase toda sua área, os anos de 2017, 2018 e 2019 concentraram valores baixos entre o centro-sul e sul baiano. Os anos de 2015, 2016 e 2020 apresentaram frequência maior de pixels secos, com a região centro-sudeste apresentando valores menores, indicando umidade, enquanto o extremo sul apresentou mais pixels secos e muitos secos. Para setembro, em todos os anos observou-se intervalos úmidos do sul ao nordeste do estado, chegando à parte da região do vale são-franciscano, com menor intensidade nos anos de 2014 e 2016. Os valores secos e muito secos se distribuíram de forma marcante no extremo oeste em todos os anos.

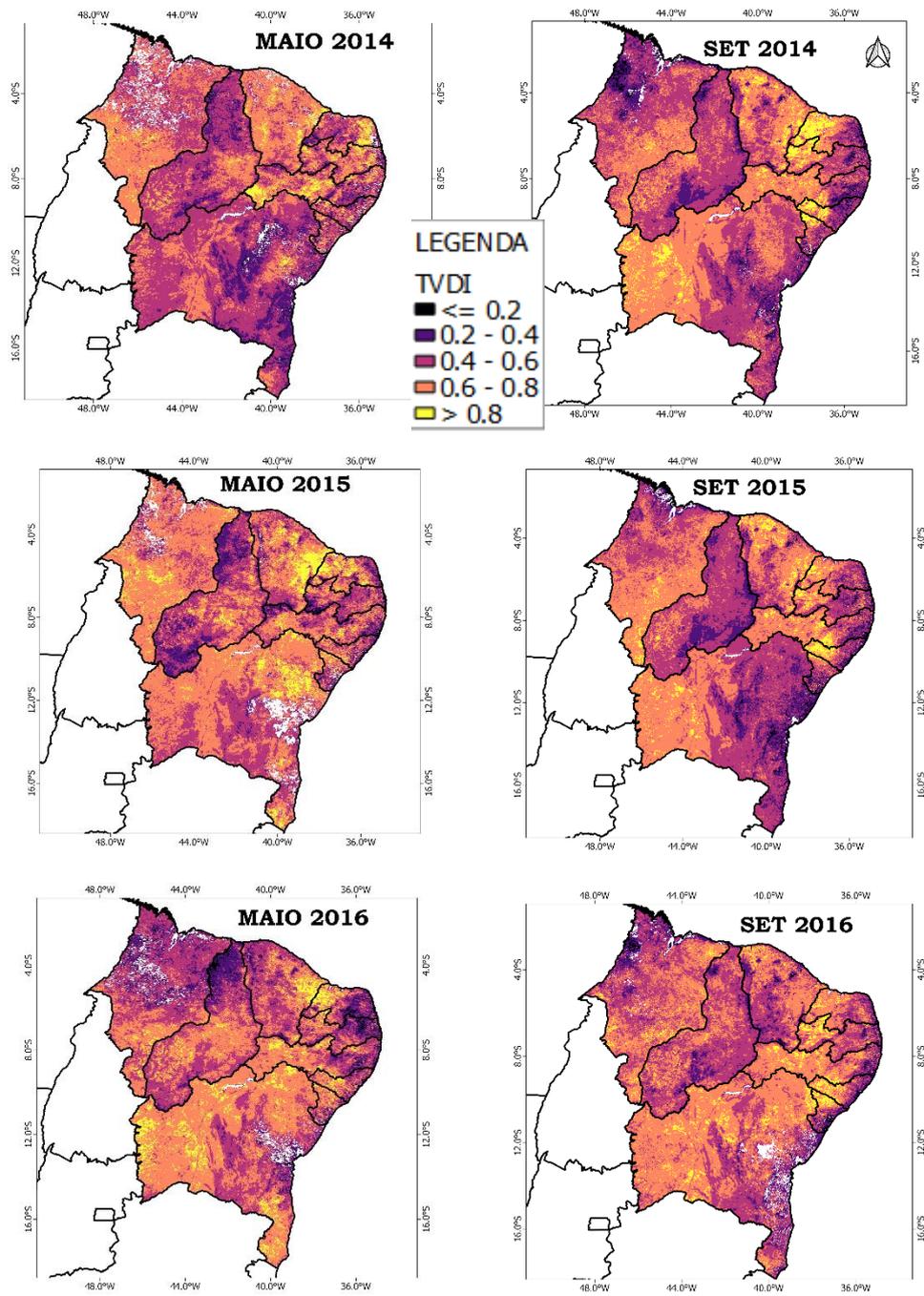
O Piauí apresentou valores baixos em maio e setembro, classificados entre úmidos e balanceados, tanto para maio quanto setembro, com distribuição espacial distinta. No mês de maio, esses valores se distribuíram por toda sua região, com destaque para 2020 que teve apenas uma pequena porção do sudoeste piauiense com pixels apresentando-se secos. Dentre os outros anos, houve maior evidência dos valores de 0.6-0.8 (secos), nas porções centro-norte, sudeste e sudoeste do estado, com 2015 e 2016 apresentando maior distribuição espacial de seca. Para setembro, 2014 e 2015 se apresentaram com maior frequência os valores úmidos e balanceados, os anos seguintes apresentaram os pixels úmidos/balanceados entre o norte, centro-norte e o sudeste do estado.

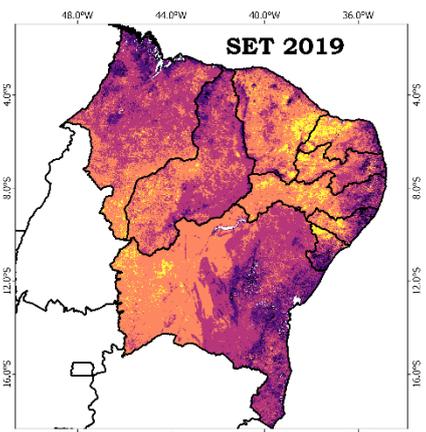
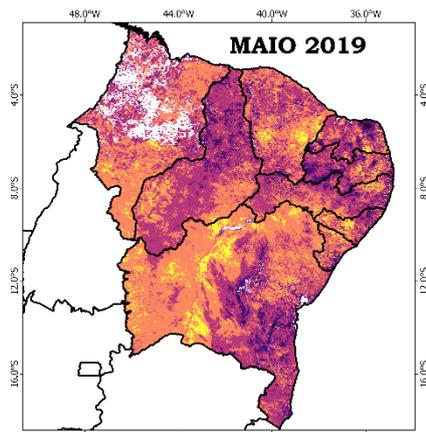
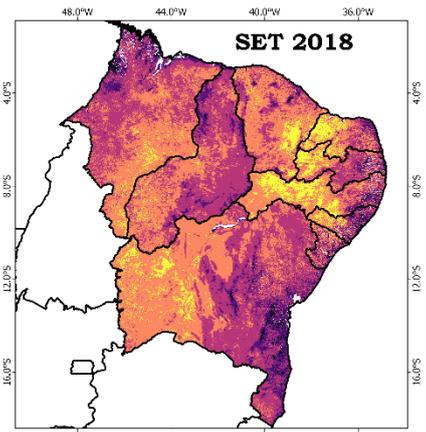
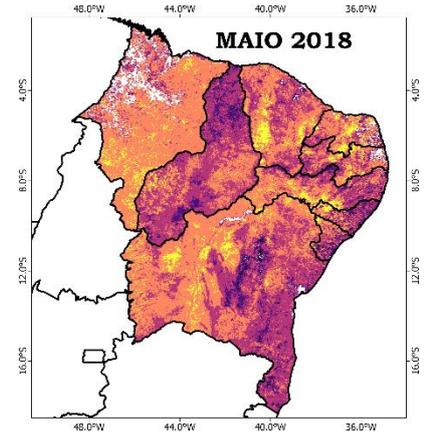
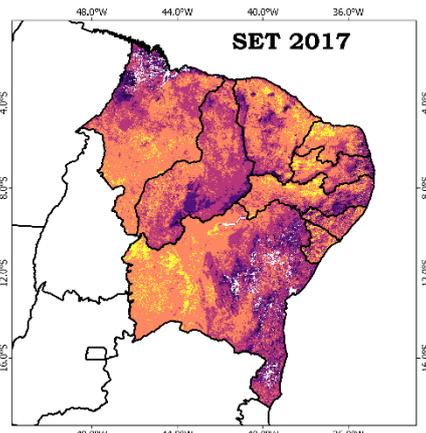
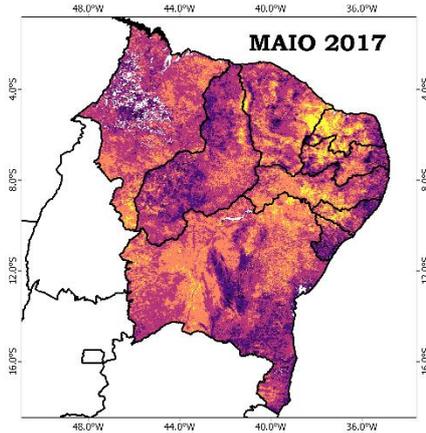
O Ceará apresentou intervalos que variaram de úmido a muito seco na maioria dos anos, tanto em maio quanto em setembro. Em maio, encontrou-se mais pixels balanceados e úmidos a partir de 2016, distribuindo-se da mesorregião nordeste ao sul. O intervalo muito seco (0.8-1.0), mostrou-se marcado em parte da região do Jaguaribe em todos os anos, com 2018, 2019 e 2020 destacando parte dos sertões cearenses com este valor. Os anos de 2014 e 2015 apresentaram valores mais altos, predominando os intervalos seco/muito seco, com menor incidência de pixels úmidos. Em setembro, observou-se o destaque de valores secos/muito secos por uma maior extensão do estado, em comparação a maio, mantendo-se constantes, com valores mais baixos marcando regiões de enclave úmido, como o Maciço de Baturité, na região norte e o Planalto da Ibiapaba, no nordeste do estado, fronteiro com o Piauí.

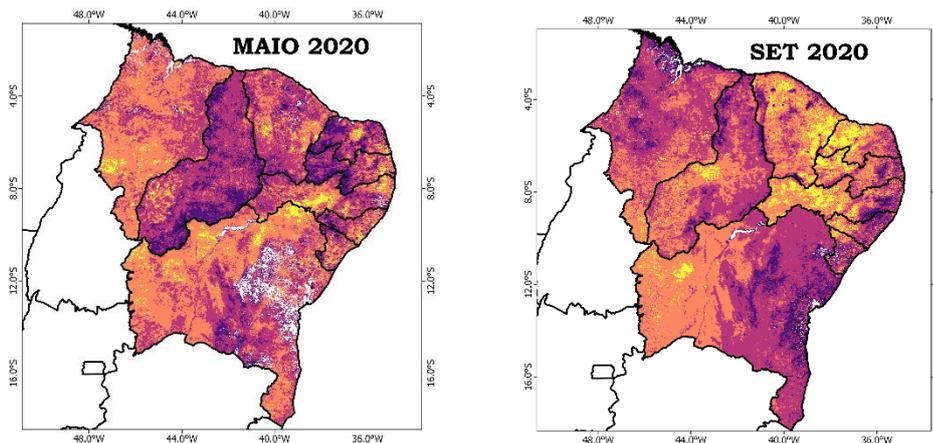
O estado do Maranhão, no mês de maio, apresentou em maior quantidade os valores de 0.6-0.8 que representam pixels secos, por quase toda sua extensão, em quatro dos sete anos analisados (2015, 2018, 2019 e 2020). O ano de 2014 possui, em pequena quantidade, valores no intervalo balanceado em partes das regiões norte/central. Já em 2016, observou-se um crescimento em relação aos valores úmidos/balanceados, com valores secos concentrados ao sul maranhense. Em 2017, o intervalo úmido se distribuiu pelo estado, com pixels secos na porção leste do estado, no limite com o Piauí e ao sul, próximo ao Tocantins. Em contrapartida, no mês de setembro, há maior frequência de pixels úmidos/balanceados, presentes em todos os anos. Em uma pequena porção no oeste do estado, destaca-se com o intervalo muito úmido (0.0-0.2) nos anos 2014, 2016 e 2017. O sul e parte do leste maranhense mantiveram-se com valores secos/muitos secos.

A região litorânea dos estados Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe obtiveram valores baixos em maio e setembro, com exceção para maio de 2014, 2015 e 2018, em que estes apresentaram porções com valores de 0.8 a 1.0 (muito seco). A região interior dos estados, em maio, apresentou padrões diferentes para cada ano, com valores variando de úmido a muito seco. Em setembro, é possível identificar que em todos os anos, o litoral dos estados manteve-se com valores menores (úmidos/balanceados) enquanto seu interior, a partir do centro destes, apresentou valores secos/muito secos.

Figura 15 – TVDI de 2014 a 2020 para o NEB







Fonte: Elaborado pela autora.

6.3 TVDI versus Umidade do Solo

As Figuras 16 a 27 exemplificam a comparação entre o TVDI e a Umidade do Solo estimadas a partir do satélite SMOS (órbitas ascendente e descendente) de 2015 a 2020. Os valores atribuídos à umidade variam de 0.0 a 0.3 $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$, com a cor amarela indicando condições secas e a preta maior umidade disponível, paleta de cores semelhante à de Rahmoune e Picchiani (2013), porém com intervalo menor. Os pixels em branco indicam áreas sem valor atribuído. É preciso reforçar que este produto é a média mensal, tanto em maio quanto em setembro, enquanto o TVDI desenvolvido neste trabalho foi gerado utilizando média de 16 dias.

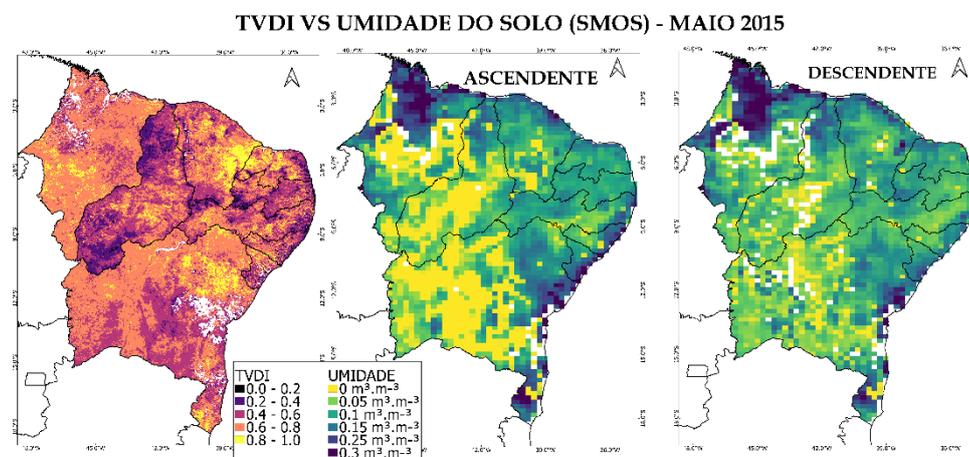
Sandholt, Rasmussen e Andersen (2002), testaram a correlação entre o TVDI estimado pelo NOAA-AVHRR e um modelo de estimação de umidade do solo, identificando o relacionamento negativo entre as variáveis (quanto maior a umidade, menor o TVDI). Cao, Feng e Wang (2017) utilizaram dados AVHRR e MODIS/Terra, encontrando correlação negativa significativa ao comparar este produto com medidas in situ de umidade. Pajarón (2010), utilizou dados SMOS para analisar a relação do TVDI com a umidade do solo estimado e demonstrou que este índice apresenta uma variação espacial que se assemelha a umidade do solo. Neste trabalho, não foi possível executar a correlação do TVDI e dados SMOS, nem dados in situ, então optou-se por fazer uma comparação qualitativa de sua distribuição espacial com os medidos pelo SMOS.

6.3.1 TVDI versus Umidade do Solo de 2015

Destaca-se que a umidade estimada a partir das medidas realizadas pelo sensor MIRAS apresentou diferenças entre suas órbitas. A órbita ascendente passa durante a manhã, às 06:00 h, enquanto a descendente capta informações às 18:00 h (Local Time), com a segunda tendendo a apresentar menos valores secos e maior quantidade de pixels brancos (sem valor).

Em maio de 2015, observou-se que as áreas indicando maior umidade nas duas órbitas se concentraram ao norte do Maranhão, Piauí, Ceará e da Bahia, chegando ao sul baiano. Além dos valores de 0.1 a 0.2 espalhados pela totalidade dos estados Rio Grande do Norte, Paraíba Pernambuco, Alagoas e Sergipe

Figura 16 – Comparação entre o TVDI e Umidade do Solo (ascendente/descendente), maio de 2015



Fonte: Elaborado pela autora.

Na órbita ascendente, há maior frequência de pixels secos ao sul maranhense, sudeste/sudoeste piauiense e extremo oeste baiano, adentrando o centro-sul baiano e parte do sul do estado. O Ceará também apresentou baixa umidade em parte da região do Jaguaribe, dos sertões cearenses e sul já Pernambuco obteve estes valores em parte do agreste e sertão pernambucano. Alagoas apresentou valores secos do leste ao sertão e Sergipe apresentou poucos valores em parte do agreste.

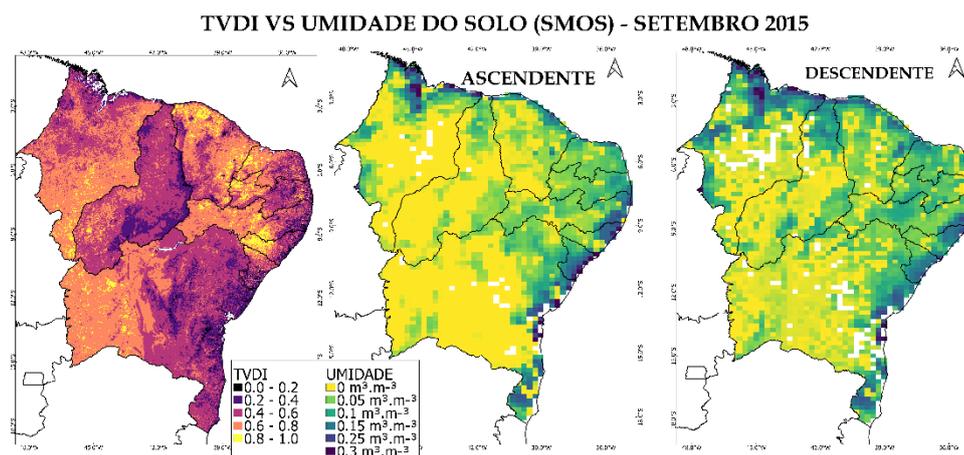
Na órbita descendente, há maior presença de pixels sem valor atribuído, além do aumento nos valores de 0.05 m³.m⁻³. Os pixels secos ao sul do Maranhão reduziram, assim como o sudeste do Piauí e centro-sul do Ceará. As áreas com maior umidade reduziram ao leste de Pernambuco e Alagoas. A Bahia apresentou pixels com valores de aproximadamente 0.3

$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ em sua região leste, com pixels até $0.2 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ ao longo do nordeste, centro-norte e oeste baiano.

Os intervalos de valores úmidos (0.2-0.4) e balanceados (0.4-0.6) ao longo dos estados coincidiram, em parte, com os valores indicando áreas úmidas do satélite SMOS. A região norte do Piauí se destaca com valores entre 0.15 e $0.25 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ nas duas órbitas, a região do Maciço de Baturité, no Ceará, também apresentou valores de 0.1 a $0.2 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. Parte da zona da mata pernambucana e leste de Alagoas que apresentaram TVDI úmido, ficaram marcados com valores entre 0.1 e $0.15 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$.

Em setembro de 2015, os pixels secos se expandiram pelo Nordeste, em ambas as órbitas. O norte do Maranhão, parte do oeste e sul concentraram valores mais úmidos. O centro-norte piauiense e sudeste apresentaram valores de 0.05 a $0.2 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. O norte do Ceará e o leste dos estados, de Pernambuco até a Bahia, demonstraram valores mais úmidos acentuados. Os pixels entre 0.05 e $0.1 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ se distribuíram pelo interior do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe.

Figura 17 – Comparação entre o TVDI e Umidade do Solo (ascendente/descendente), setembro de 2015



Fonte: Elaborado pela autora.

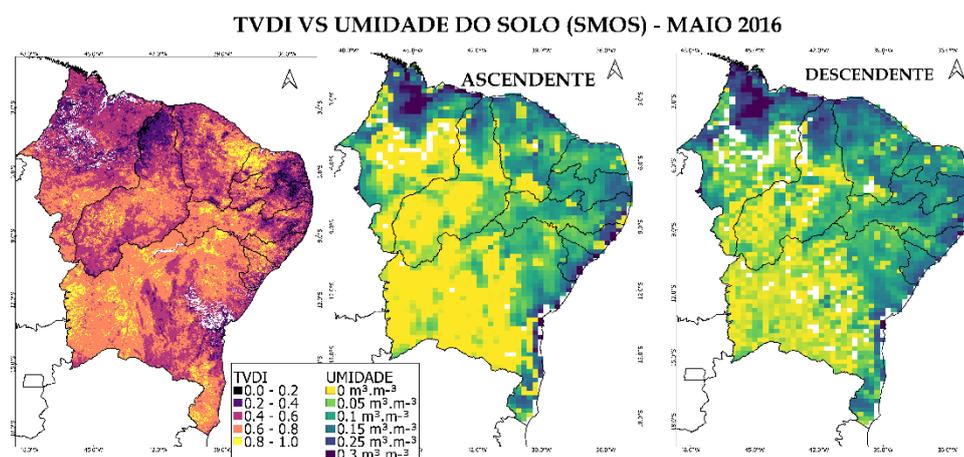
Com relação ao TVDI, os valores úmidos e balanceados ao norte do Maranhão se dispuseram em posições semelhantes aos do SMOS. Já o Piauí apresentou valores balanceados/úmidos por toda sua extensão, enquanto os dados de umidade apresentaram-se marcados em partes do estado. O Ceará, com valores balanceados/úmidos (0.2-0.4/0.4-0.6) marcados nos enclaves úmidos e em parte da região dos sertões também teve valores evidenciados nas duas órbitas, principalmente na descendente.

O leste de Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia até o recôncavo baiano obtiveram valores úmidos preponderantes no índice (0.2-0.4/0.4-0.6) e apareceram com destaque nas duas órbitas, com valores de umidade altos. O extremo sul baiano apresentou os pixels próximos a $0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, demonstrando padrão similar, enquanto o TVDI permaneceu no intervalo de balanceado/úmido para toda a seção nordeste/sul da Bahia.

6.3.2 TVDI versus Umidade do Solo de 2016

Para maio de 2016, os valores de umidade SMOS distribuíram-se de forma semelhante ao ano anterior, porém este mês evidenciou aumento na frequência de pixels secos ($0 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$), principalmente entre o Piauí e Bahia. Os pixels mais úmidos também apresentaram decréscimo ao longo de todo o leste nordestino.

Figura 18 – Comparação entre o TVDI e Umidade do Solo (ascendente/descendente), maio de 2016



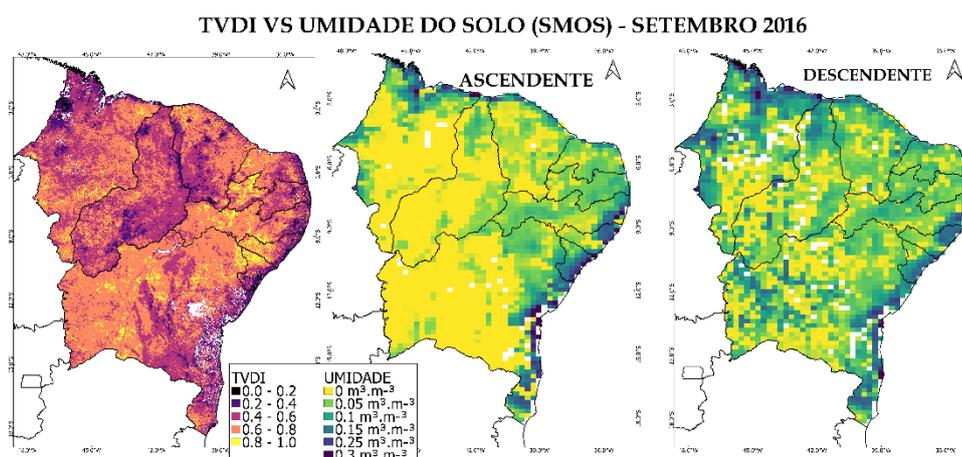
Fonte: Elaborado pela autora.

O TVDI estimado apresentou maior presença de pixels sem valor (nuvens) no Maranhão e na Bahia. Demonstrou pixels balanceados/úmidos do centro ao norte do Maranhão e as órbitas do SMOS demonstraram padrão parecido, com a descendente apresentando mais similaridade. No Piauí, os valores de TVDI indicaram pixels úmidos ao norte e centro-norte, enquanto a região sudeste permaneceu com pixels secos, retomando valores balanceados na região sudoeste. Neste estado, ambas as órbitas apresentaram valores altos de umidade na região centro-norte piauiense e sudeste, com parte do sudoeste marcado por pixels de $0.08 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$.

O Ceará apresentou maior frequência de pixels do TVDI balanceados em comparação ao ano de 2015, enquanto os valores das órbitas prevaleceram parecidos. A região de Jaguaribe que aparece com o intervalo muito seco do índice, aparece com o valor $0 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ na órbita ascendente e de forma mais dispersa na órbita descendente. O leste do Rio Grande do Norte, fronteiro com o agreste paraibano concentraram pixels úmidos ($0.2-0.4$), enquanto a mesma região, nas imagens correspondentes, apresentou umidade em 0.1 e $0.2 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. Do leste ao sul da Bahia, houve a presença de pixels balanceados a secos, com maior frequência de 0.6 a 0.8 no extremo sul do estado, enquanto a umidade se distribuiu entre 0.15 e $0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ nas duas órbitas. A órbita ascendente apresentou pixels mais úmidos que a segunda.

No mês de setembro de 2016, em relação a maio, os valores secos ($0 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$) aumentaram na órbita ascendente, enquanto na descendente, pixels entre 0.1 e $0.25 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ distribuíram-se na maior parte dos estados, com os valores mais úmidos chegando à parte do leste maranhense e extremo oeste baiano. Na ascendente, se evidenciou que os valores mais úmidos ($0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$) ficaram presentes no norte maranhense e na região leste dos estados de Pernambuco até a Bahia, enquanto o centro do Maranhão, sudoeste do Piauí e oeste da Bahia permaneceram secos.

Figura 19 – Comparação entre o TVDI e Umidade do Solo (ascendente/descendente), setembro de 2016



Fonte: Elaborado pela autora.

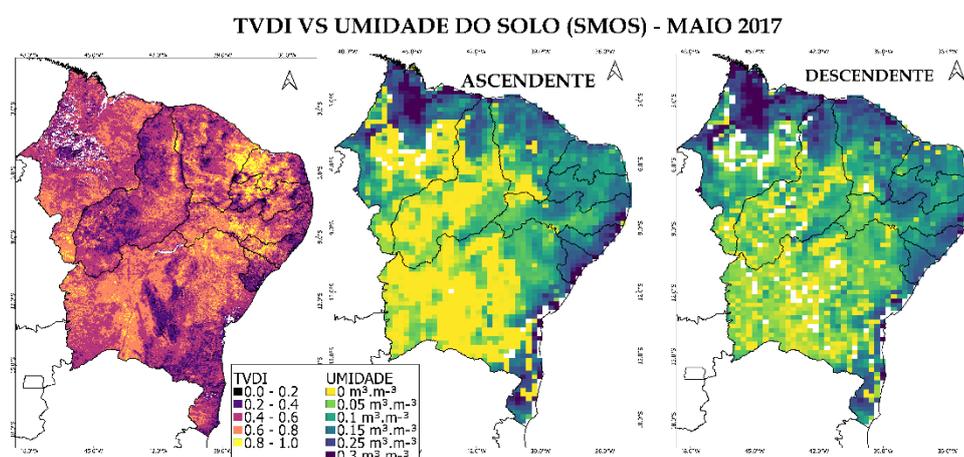
O TVDI calculado para este mês apresentou maior frequência de pixels secos no geral, tendo como destaque a região oeste do Maranhão, parte do norte piauiense e leste sergipano, apresentando valores muito úmidos ($0.0-0.2$). A órbita ascendente indicou esta porção do Maranhão com valores secos e a descendente umidade ente 0.1 e $0.2 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, já no

Piauí, a órbita descendente apresentou pixels entre 0.05 e 0.1 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Em Sergipe, ambas as órbitas marcaram a região leste indicando umidade, com a ascendente chegando a mostrar 0.3 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

6.3.3 TVDI versus Umidade do Solo de 2017

Em maio de 2017, os valores estimados pelo SMOS, evidenciaram um aumento na quantidade de pixels mais úmidos (0.3 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$) na região oeste maranhense, fronteira com Tocantins e na Região Metropolitana de Fortaleza/Maciço de Baturité, no Ceará. Além disso, os pixels úmidos mantiveram-se ao norte do Maranhão e leste do Nordeste, entre Pernambuco e Bahia. Os pixels de 0.25 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ também apresentaram maior frequência ao longo dos estados.

Figura 20 – Comparação entre o TVDI vs Umidade do Solo (ascendente e descendente), maio de 2017



Fonte: Elaborado pela autora

Com relação ao TVDI deste mês, houve presença de pixels sem valor (nuvens) no Maranhão. Houve a distribuição de pixels balanceados/úmidos pela extensão do estado, concentrando alguns pixels muito úmidos ao centro/leste. Nos valores das órbitas, as duas apresentaram valores de 0.2 a 0.3 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ adentrando ao centro maranhense. No Piauí, o índice indicou valores úmidos/balanceados em maior frequência, enquanto os dados da órbita ascendente apresentaram pixels secos (0 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$) em maior incidência. Enquanto isso, a descendente apresentou maior presença dos valores entre 0.05 e 1 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

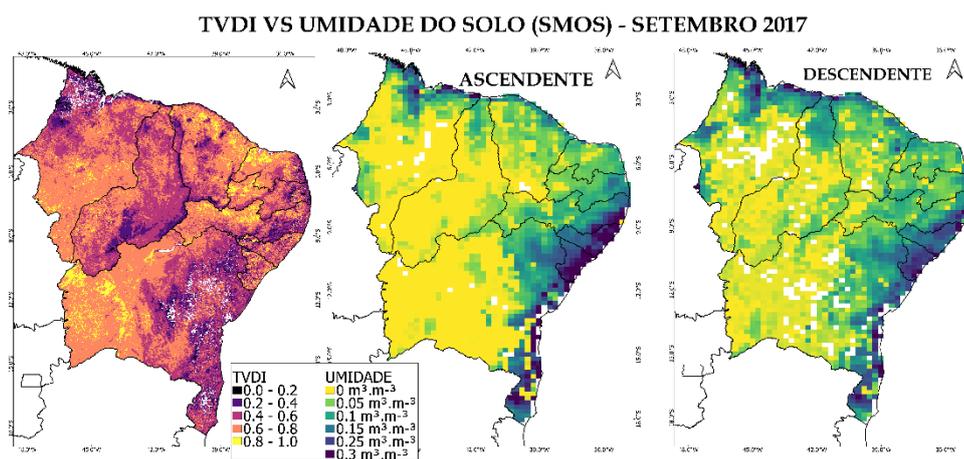
No Ceará, os valores de TVDI úmidos/balanceados foram apresentados em maioria, com a presença de pixels muito secos na região do Jaguaribe. Ambas as órbitas apresentaram o estado com maior frequência de pixels entre 0.15 e 0.25 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, com a região do sul cearense

marcada com menor umidade, assim como uma pequena área dos sertões cearenses. Rio Grande do Norte e Paraíba apresentaram maior frequência do intervalo muito seco, enquanto ambas as órbitas indicaram valores de umidade entre 0.15 e $0.25\text{m}^3.\text{m}^{-3}$.

O leste de Pernambuco até Sergipe apresentou maior frequência de valores úmidos/balanceados e as duas órbitas demonstraram essa região com valores de 0.25 a $0.3\text{m}^3.\text{m}^{-3}$. Do agreste pernambucano até a fronteira do estado com o Piauí, os valores secos de TVDI destacaram-se, enquanto as órbitas indicaram pixels de 0 a $0.05\text{m}^3.\text{m}^{-3}$, com parte do sertão pernambucano (fronteiriço com o Ceará), apresentando $0\text{m}^3.\text{m}^{-3}$. O sul da Bahia aparece marcado por valores úmidos/balanceados, já os valores de umidade nas órbitas, indicaram a presença de pixels variando entre 0 , 0.25 e $0.3\text{m}^3.\text{m}^{-3}$.

Para setembro de 2017, o leste do Nordeste, entre os estados de Pernambuco e Bahia, destacou-se por apresentar maior frequência do valor $0.3\text{m}^3.\text{m}^{-3}$, em comparação aos anos anteriores. Sua distribuição espacial nas demais áreas, demonstrou aumento de pixels secos ($0\text{m}^3.\text{m}^{-3}$), principalmente no sudoeste piauiense e extremo oeste baiano.

Figura 21 – Comparação entre o TVDI vs Umidade do Solo (ascendente e descendente), setembro de 2017



Fonte: Elaborado pela autora.

O TVDI estimado para o Maranhão, em setembro, apresentou valores úmidos/balanceados espalhados entre suas regiões oeste, norte e leste, com valores muito úmidos marcados em parte do oeste, fronteiriço com o Pará. Em ambas as órbitas do SMOS, parte destas áreas obtiveram valores entre 0 e $0.25\text{m}^3.\text{m}^{-3}$, porém a área de valores muito úmidos do TVDI não apareceu nestas imagens de umidade.

Para o Piauí, os intervalos de maior frequência foram de pixels secos e balanceados, enquanto o intervalo úmido concentrou-se na região sudoeste piauiense. Já a umidade do

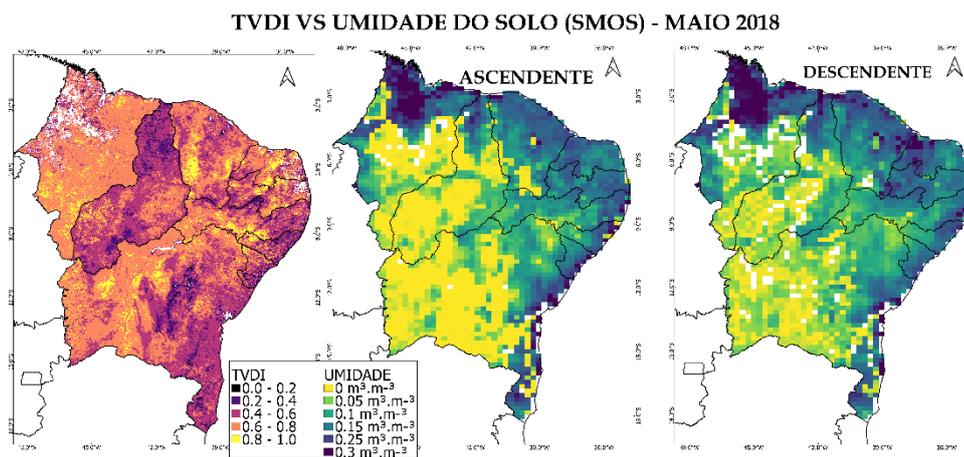
SMOS, mostrou maiores valores ao norte e sudeste do estado, nas duas órbitas, com a descendente indicando pixels de $0.05 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ na região sudoeste. O Ceará apresentou mais pixels secos, seguidos dos balanceados, com alguns pixels secos na região norte. A órbita ascendente demonstrou maior frequência de $0 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, enquanto a descendente apresentou o valor de $0.05 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. A Região Metropolitana de Fortaleza e o Maciço de Baturité que aparecem com valores baixos de TVDI, obtiveram valores altos de umidade em ambas as órbitas (0.15 a $0.25 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$).

Do leste de Pernambuco ao sul da Bahia, há grande variação na frequência de intervalos do TVDI. Do leste ao agreste pernambucano é possível encontrar pixels mais úmidos, enquanto Alagoas e Sergipe apresentaram maior frequência de pixels secos, já o território baiano apresentou maior quantidade de pixels balanceados e úmidos, com incidência de pixels secos próximos ao recôncavo baiano. A órbita ascendente destaca toda a área com incidência de alta umidade ($0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$), com alguns pixels secos ($0 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$) na Região Metropolitana de Salvador e no sul baiano. A descendente apresentou padrão similar, porém com valores em torno de $0.25 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, o nordeste e parte do centro-sul baiano também apresentaram valores entre $0,15$ e $0,25 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, coincidindo em parte com o TVDI que obteve valores balanceados e em menor proporção úmidos.

6.3.4 TVDI versus Umidade do Solo de 2018

Em maio de 2018, os dados das duas órbitas do satélite SMOS não diferiram muito em comparação ao ano anterior. Houve um aumento nos pixels de $0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ ao norte do Ceará, fronteiro com o Piauí, no leste do Rio Grande do Norte e na região do sertão paraibano. Também foi possível observar o aumento de pixels entre 0.15 e $0.25 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ ao sul do Ceará e na região do sertão pernambucano.

Figura 22 – Comparação entre o TVDI vs Umidade do Solo (ascendente e descendente), maio de 2018



Fonte: Elaborado pela autora.

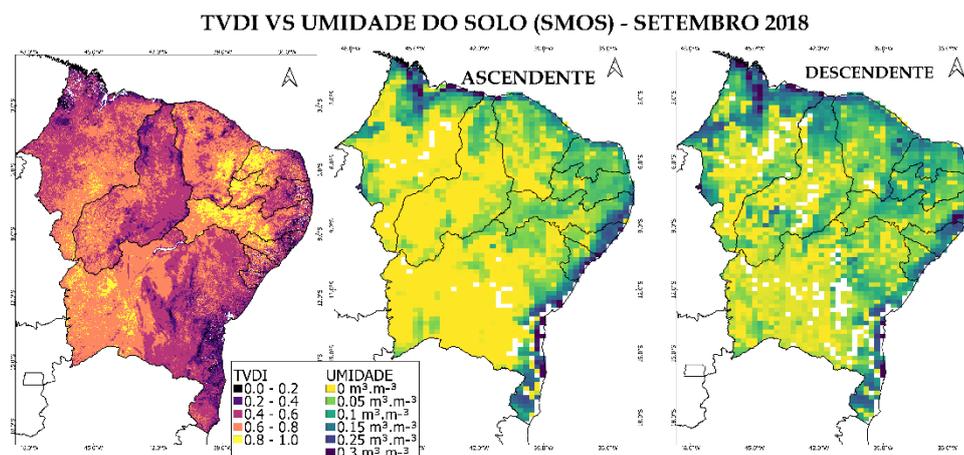
O TVDI deste mês apresentou pixels sem valor (nuvens) entre o oeste e centro do Maranhão, além da Região Metropolitana de Fortaleza, no Ceará e parte do leste potiguar e paraibano. Maranhão apresentou maior frequência de pixels secos no índice, com alguns pixels indicando o intervalo balanceado na região centro-oeste do estado. Enquanto isso, as duas órbitas indicaram umidade chegando a $0.3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ no centro-norte do estado e parte do oeste/sul maranhense com valores entre 0.15 e $0.3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

O Piauí obteve maior frequência do intervalo de pixels balanceados e úmidos, com a região sudeste e parte da região sudoeste (fronteiriça com o Maranhão) apresentando pixels secos. As duas órbitas indicaram valores altos de umidade do norte ao centro-norte piauiense e sudeste piauiense, contando, ainda, com pixels entre 0.15 e $0.25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ espalhados na região sudoeste. No Ceará, o TVDI indicou maior frequência de pixels secos, parte dos sertões e do Jaguaribe concentrando valores muito secos ($0.8-1.0$). Parte do noroeste, sertões e parte do sul cearense indicaram valores balanceados/úmidos. Já as órbitas apresentaram maior frequência de umidade alta, com parte do sul e dos sertões cearenses apresentando o valor de $0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

O Rio Grande do Norte e a Paraíba apresentaram maior frequência de valores secos/muito secos no TVDI, inclusive em sua porção leste. Os valores de umidade nas duas órbitas foram altos, chegando a pixels com $0.3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, demonstrando contraste com o índice estimado. Do leste de Pernambuco, de Alagoas, e Sergipe até o sul da Bahia se evidenciou maior frequência de pixels úmidos/balanceados. A umidade medida pelas órbitas demonstrou toda a área leste de Pernambuco a Bahia com valores altos (0.25 a $0.3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), se assemelhando ao índice, apesar de se encontrar alguns pixels secos ($0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) em Alagoas na órbita ascendente e ao sul da Bahia em ambas as órbitas.

Em setembro de 2018, se observa o aumento dos pixels secos, em relação ao mês de maio do mesmo ano, principalmente no nordeste baiano, sul cearense, sudoeste piauiense e sul maranhense, nas duas órbitas do SMOS. Os valores de 0.25 e $0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ diminuíram, dando lugar à maior frequência dos valores entre 0.05 e $0.15 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ em todos os estados do Nordeste.

Figura 23 – Comparação entre o TVDI vs Umidade do Solo (ascendente e descendente), setembro de 2018



Fonte: Elaborado pela autora.

O TVDI de estimado para o Maranhão apresentou maior frequência de pixels úmidos/balanceados, em comparação a maio do mesmo ano. Estes pixels distribuíram-se ao norte e oeste maranhense. As órbitas ascendente e descendente mediram valores entre 0.15 e $0.25 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ no norte e oeste maranhense, chegando a $0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ na região próxima a à Baía de São Marcos.

Para o Piauí, os pixels balanceados/úmidos foram identificados no norte, centro-norte e sudeste, com valores secos marcados no sudoeste do estado. A umidade mensurada pelas duas órbitas apresentou distribuição dos valores 0.05 e $0.15 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ ao longo do norte, centro-norte e sudeste piauiense. A órbita descendente também apresentou estes valores adentrando a região sudoeste piauiense.

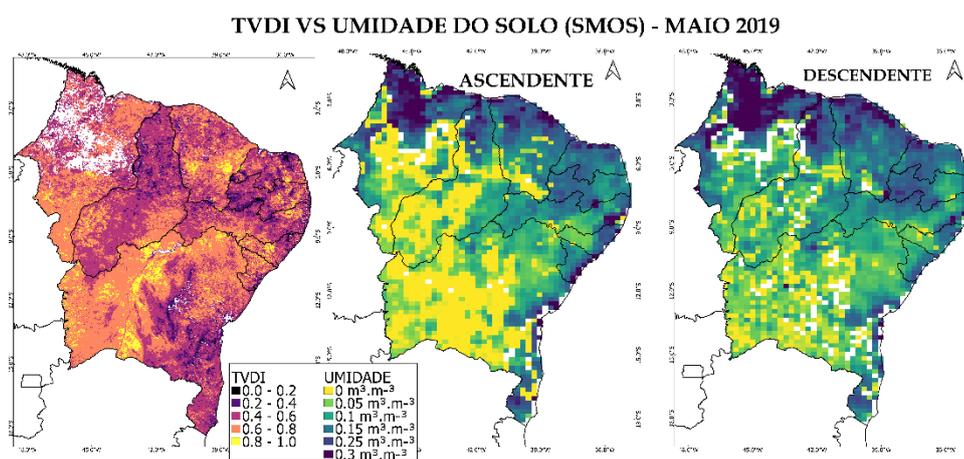
O Ceará apresentou maior frequência de valores do TVDI secos ($0.6-0.8$), seguido pelos muito secos e balanceados. Os valores balanceados e úmidos, estiveram presentes em enclaves úmidos e na Região Metropolitana de Fortaleza. Os valores estimados pela órbita ascendente, demonstraram maior frequência de pixels secos ($0 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$), estendendo-se por parte do noroeste, do Jaguaribe e do sul cearense. A órbita descendente apresentou menor incidência dos pixels com secos, com a maioria do estado marcada por valores de 0.05 a $0.1 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$.

A porção leste do Nordeste, compreendendo o Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia obtiveram valores muito úmidos, úmidos e balanceados, com menor frequência de pixels secos. As duas órbitas apresentaram valores entre 0.05 e 0.15 $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ no Rio Grande do Norte e na Paraíba, enquanto a partir de Pernambuco até o sul da Bahia, os valores passam a ser 0.25 $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$.

6.3.5 TVDI versus Umidade do Solo de 2019

Em maio de 2019, os valores medidos pelo satélite SMOS em ambas as órbitas apresentaram distribuição espacial semelhante, porém evidenciou-se o aumento de pixels entre 0.1 e 0.25 $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$, principalmente no extremo oeste da Bahia e sudoeste do Piauí, recobrimdo a maior parte dos estados. Os pixels com 0.3 $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ também aumentaram ao norte do Maranhão, do Piauí e Ceará.

Figura 24 – Comparação entre o TVDI vs Umidade do Solo (ascendente e descendente), maio de 2019



Fonte: Elaborado pela autora.

Em maio de 2019, observou-se a maior quantidade de nuvens (pixels sem valores) no centro-norte do Maranhão. O intervalo de pixels secos foi o de maior frequência no estado, seguido pelo intervalo balanceado, com o segundo se distribuindo entre o norte, oeste e centro maranhense. A umidade mais alta indicada pelas órbitas concentrou-se ao norte e centro do estado. Na ascendente, valores de 0.1 a 0.25 $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ marcaram o oeste do estado, fronteiro com o Pará, apresentando pixels secos espalhados em parte do centro, leste e sul. Na descendente, a maior frequência de pixels foi entre 0.1 e 0.25 $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$, contando com poucos pixels secos.

Já no estado do Piauí, o TVDI com intervalo balanceado/úmido se distribuiu do norte até parte do sudoeste piauiense, com o sudeste marcado por valores secos. As duas órbitas apresentaram valores altos de umidade ao centro-norte do estado e parte das regiões sudeste/sudoeste. A descendente recobriu quase 80% do Piauí com valores de 0.1 a 0.25 m³.m⁻³. Os pixels secos de TVDI no sudoeste, próximos ao Maranhão, apresentaram distribuição semelhante às orbitas.

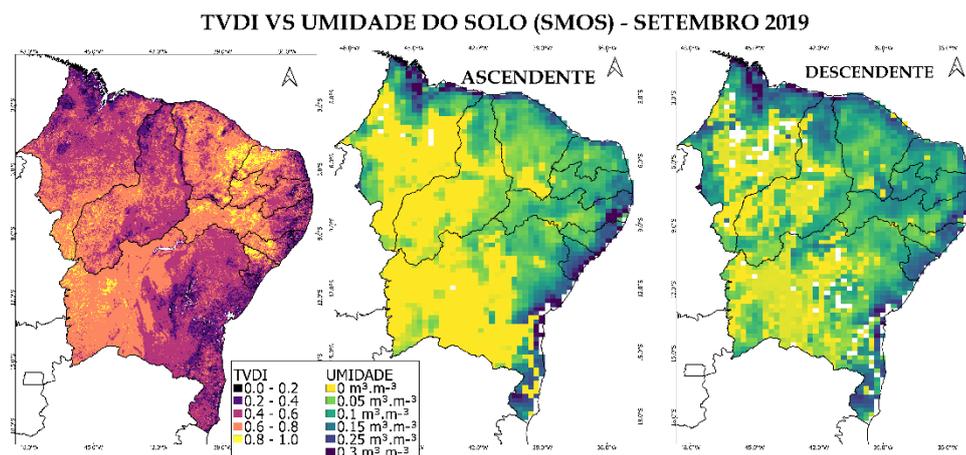
Já o Ceará, apresentou maior frequência dos intervalos balanceado e seco, com a região do Jaguaribe e parte dos sertões cearenses apresentando valores muito secos. Nos dados de umidade, os valores mais altos foram no norte e parte do noroeste cearense, com maior frequência de valores até 0.25 m³.m⁻³. Para o Rio Grande do Norte e a Paraíba, observou-se valores de TVDI predominantes entre balanceados e úmidos, com o intervalo muito úmido presente entre o leste e agreste potiguar. Os valores de umidade para os dois estados, em ambas as órbitas, ficaram entre 0.15 e 0.25 m³.m⁻³, com o segundo valor marcado entre a região central potiguar e Borborema na Paraíba, até a fronteira de ambos com o Ceará.

Pernambuco e Alagoas apresentaram maior frequência de pixels balanceados e úmidos, enquanto Sergipe obteve pixels secos predominando no estado, seguidos por pixels balanceados. As duas órbitas do SMOS, mensuraram valores de umidade altos para o leste dos três estados (0.25 a 0.3 m³.m⁻³). Parte da região do São Francisco pernambucano e agreste/sertão alagoano e sergipano apresentaram valores de TVDI secos/muito secos, enquanto os dados de umidade mostraram valores entre 0 e 0.05 m³.m⁻³ nestas áreas.

A Bahia apresentou pixels úmidos/balanceados marcados em parte do centro-norte, centro-sul e sul do estado. Pixels secos se distribuíram do nordeste ao extremo oeste baiano. Os dados de umidade SMOS, nas duas órbitas, evidenciaram valores entre 0.15 e 0.25 m³.m⁻³ da região do vale São-Franciscano da Bahia até o sul, com a presença de pixels secos 0 m³.m⁻³ ao longo de sua extensão.

Para setembro de 2019, observou-se que os pixels de 0.15 e 0.3 m³.m⁻³ reduziram em comparação a maio do mesmo ano. Os pixels secos adentraram o oeste da Bahia, sul do Ceará, sudeste/sudoeste do Piauí e centro-sul do Maranhão, distribuição similar à de setembro de 2018. Também é possível identificar maior distribuição de pixels entre 0.05 e 1 m³.m⁻³ no centro-norte do Ceará e nos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe.

Figura 25 – Comparação entre o TVDI vs Umidade do Solo (ascendente e descendente), setembro de 2019



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao comparar o TVDI de setembro de 2019 com o mês de maio do mesmo ano, ocorreu o aumento de valores balanceados/úmidos no Maranhão, com destaque para a concentração de pixels úmidos na região oeste maranhense. A umidade estimada pelo SMOS, demonstrou valores altos ao norte, nas duas órbitas. A órbita descendente apresentou maior frequência de valores entre 0.15 e 0.25 $m^3.m^{-3}$ entre o oeste e sul maranhense, enquanto a ascendente apresentou pixels entre 0.05 e 0.15 $m^3.m^{-3}$.

No Piauí, houve a maior quantidade de valores úmidos/balanceados, do norte ao sudoeste e parte do sudeste piauiense. A maior parte do sudeste do estado, fronteira com o Maranhão e a Bahia, apresentou pixels secos. A umidade medida pelo SMOS, assim como em anos anteriores manteve-se marcada entre o norte/centro-norte piauiense, com a órbita ascendente apresentando pixels mais úmidos, distribuídos também em parte da região sudeste.

No Ceará, o TVDI apresentou maior frequência de pixels secos e muito secos, com a região do Jaguaribe e parte do sul cearense marcados por valores muito secos. Quanto aos valores de umidade, ambas as órbitas exibiram pixels de 0.05 a 0.25 $m^3.m^{-3}$. Os valores de maior frequência na órbita ascendente foram 0.05 $m^3.m^{-3}$, com máximo de 0.2 $m^3.m^{-3}$.

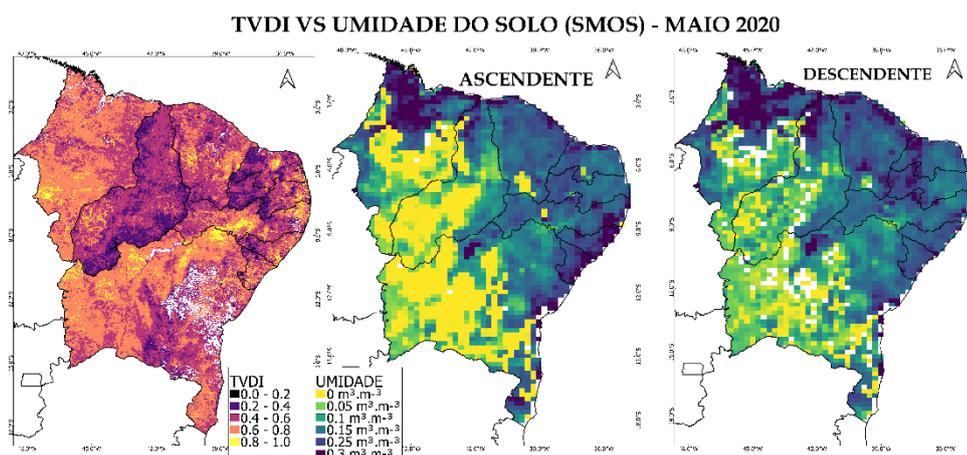
A porção leste do Nordeste, compreendendo os estados do Rio Grande do Norte à Bahia, apresentou maior quantidade de pixels nos intervalos balanceado/úmido. As mesorregiões destes estados, a partir do centro potiguar, da Borborema paraibana, parte do agreste pernambucano, sertão alagoano e sertão sergipano apresentaram-se marcadas por valores secos e muito secos, em contraste ao leste. O extremo oeste baiano também adquiriu, principalmente, valores secos.

Os dados de umidade SMOS indicaram valores mais altos (0.25 a $0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$) no leste dos estados de Pernambuco ao sul da Bahia, como nos anos anteriores, com destaque para a região entre Pernambuco e Alagoas na órbita ascendente, com pixels de $0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. Este valor também apareceu na Bahia, próximo ao recôncavo baiano e no extremo sul do estado, onde o TVDI demonstrou, em sua maioria, pixels balanceados.

6.3.6 TVDI versus Umidade do Solo de 2020

Em maio de 2020, observou-se, nas duas órbitas, o aumento na frequência de pixels com valor de $0.25 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, em comparação com 2019, estendendo-se pelo nordeste e vale São-Franciscano baiano, além da região oeste do Maranhão. Os pixels de $0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, além da distribuição similar aos anos anteriores, também aumentaram, se distribuindo em partes do norte e do sul cearense, oeste/centro potiguar e o sertão paraibanos.

Figura 26 – Comparação entre o TVDI vs Umidade do Solo (ascendente e descendente), maio de 2020



Fonte: Elaborado pela autora.

O TVDI de maio de 2020, para o Maranhão, apresentou maior frequência de pixels secos, com valores balanceados distribuídos entre o norte, leste e parte do centro maranhense. Os valores de umidade, nas órbitas, mostraram os maiores valores de úmidos ao norte e parte do oeste do estado. A descendente apresentou a distribuição de valores até $0.15 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ ao longo de todo estado, sendo maior do que a distribuição de pixels secos.

No Piauí, o TVDI estimado foi, ao longo de sua extensão, baixo, mantendo-se entre os intervalos úmidos/balanceados. Ressalta-se que parte do sudeste/sudoeste piauiense,

fronteiriço com Pernambuco e Bahia, obteve valores úmidos concentrados. Apenas parte do sudoeste piauiense apresentou pixels secos/muito secos. A umidade do solo estimada pelo SMOS, nas duas órbitas, mostrou valores maiores (0.25 a $0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$) do norte ao centro-norte e em parte do sudeste/sudoeste. Também é possível identificar a área que obteve pixels secos no TVDI com valores secos ($0 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$), mesmo com a órbita descendente apresentando valores de 0.05 a $0.15 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ por quase toda a extensão do estado.

O TVDI do Ceará obteve maior frequência de pixels úmidos/balanceados em relação ao ano anterior, com pixels secos no noroeste cearense e muito secos na região do Jaguaribe. Os valores de umidade se distribuíram de forma homogênea nas duas órbitas, com a maior frequência de pixels com valor de $0.25 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ e pixels secos ($0 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$) ao sul do estado. Alguns pixels indicando maior umidade se distribuíram ao norte, como anos anteriores, noroeste e sul.

O TVDI estimado para o Rio Grande do Norte e a Paraíba, apresentou maior incidência de valores úmidos/balanceados, com parte do centro potiguar e do leste paraibano apresentando uma pequena parcela de valores secos/muito secos. Os valores úmidos se concentraram no oeste potiguar e sertão paraibano. Os dados de umidade do solo indicaram o valor $0.25 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ em quase toda a extensão dos estados, enquanto os pixels de $0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ ocorreram em regiões semelhantes às do TVDI.

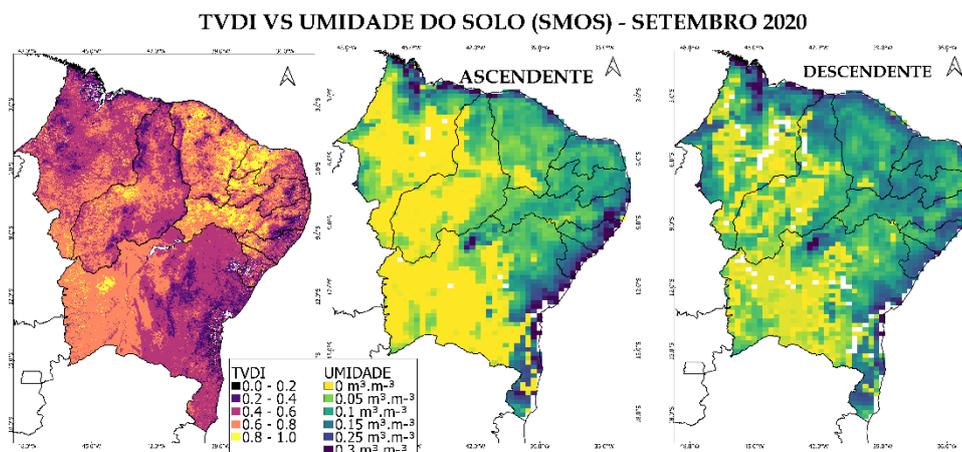
O TVDI estimado para os estados de Pernambuco, Alagoas e Sergipe apresentou maior frequência de pixels balanceados, seguidos por pixels úmidos e muito secos. O leste de Pernambuco apresentou maior quantidade de pixels úmidos, enquanto o leste alagoano obteve valores balanceados e secos e o leste sergipano concentrou maior frequência de pixels secos/muito secos. A umidade estimada pelo SMOS, na órbita ascendente, apontou a região leste de Pernambuco até Sergipe, com valores de $0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. Na descendente, os valores mantiveram-se em $0.25 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ nos três estados.

O leste da Bahia até sua região sul, apresentou presença de nuvens (pixels sem valores) entre sua porção nordeste e centro-norte baiano. A umidade entre $0 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ e $0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, com as regiões do vale São-Franciscano e nordeste/centro-sul baiano indicando o valor de $0.25 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. Parte do vale São-Franciscano da Bahia, próximo ao Lago Sobradinho, as duas órbitas indicaram pixels com maior umidade ($0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$).

Em setembro de 2020, para as duas órbitas do SMOS, os valores de $0.25 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ em relação a maio do mesmo ano, reduziram, dando lugar aos pixels de umidade com valores até $0.15 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. O valor máximo de umidade ($0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$) manteve-se distribuído, em menor proporção, ao norte do Maranhão, extremo norte do Ceará e leste do Nordeste. Neste ano em

específico, o Lago Sobradinho, que apareceu destacando-se em maio, manteve-se com pixels de umidade de $0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$.

Figura 27 – Comparação entre o TVDI vs Umidade do Solo (ascendente e descendente), setembro de 2020



Fonte: Elaborado pela autora.

Para o TVDI deste mês, o Maranhão obteve maior frequência de pixels balanceados, em relação a maio de 2020. Pixels úmidos do índice (0.0-0.2), concentraram-se no extremo norte e parte do oeste maranhense. Os dados de umidade, nas duas órbitas, mostraram a maior ocorrência dos pixels de $0.3 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ no norte do Maranhão. Parte do oeste (duas órbitas) e do sul (órbita descendente) é evidenciada com valores de 0.05 a $0.15 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, assim como em anos anteriores.

O Piauí indicou valores balanceados em maior frequência, com os secos em seguida. Os valores úmidos/balanceados concentraram-se entre o norte e centro-norte piauiense, assim como parte das regiões sudeste e sudoeste. O intervalo de valores secos permaneceu na maior parte do sudoeste piauiense, semelhante aos dados já analisados. A umidade mensurada pelo SMOS, nas duas órbitas, também se apresentou com distribuição identificada anteriormente. Estes valores, entre o norte e sudeste/sudoeste do estado, indicam semelhança com o TVDI.

No Ceará, o intervalo de maior frequência foi de pixels secos, seguido em menor proporção pelo intervalo balanceado. Os locais identificados com valores úmidos/balanceados foram, em parte, enclaves úmidos como o Planalto da Ibiapaba, Serra da Meruoca e Serra de Uruburetama. Enquanto isso, os valores de umidade do solo, nas duas órbitas, foram identificados entre 0.05 e $0.15 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ ao longo do estado. O sul cearense foi marcado por valores secos de $0 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$.

Os estados constituintes da região leste (Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia) do Nordeste apresentaram maior frequência de pixels úmidos/balanceados nesta área. As regiões a partir do centro potiguar, Borborema na Paraíba, parte do agreste pernambucano e sertão sergipano, se destacam com maior presença de pixels secos/muito secos. A Bahia apresenta valores secos a partir de parte do centro-norte/centro-sul até o extremo oeste.

A umidade do solo nestes estados, para as duas órbitas, variou entre 0.05 e 0.3 m³.m⁻³, com a órbita ascendente mostrando maior umidade (0.3 m³.m⁻³) entre Pernambuco e Bahia, enquanto a descendente permaneceu com o valor de 0.25 m³.m⁻³. Na Bahia, os valores de umidade se distribuíram de forma semelhante aos anteriores, com o acréscimo da região próxima a Lagoa Sobradinho, que no TVDI de setembro ficou marcada com os valores entre úmido e balanceado.

6.4 Dados de precipitação MERGE-GPM

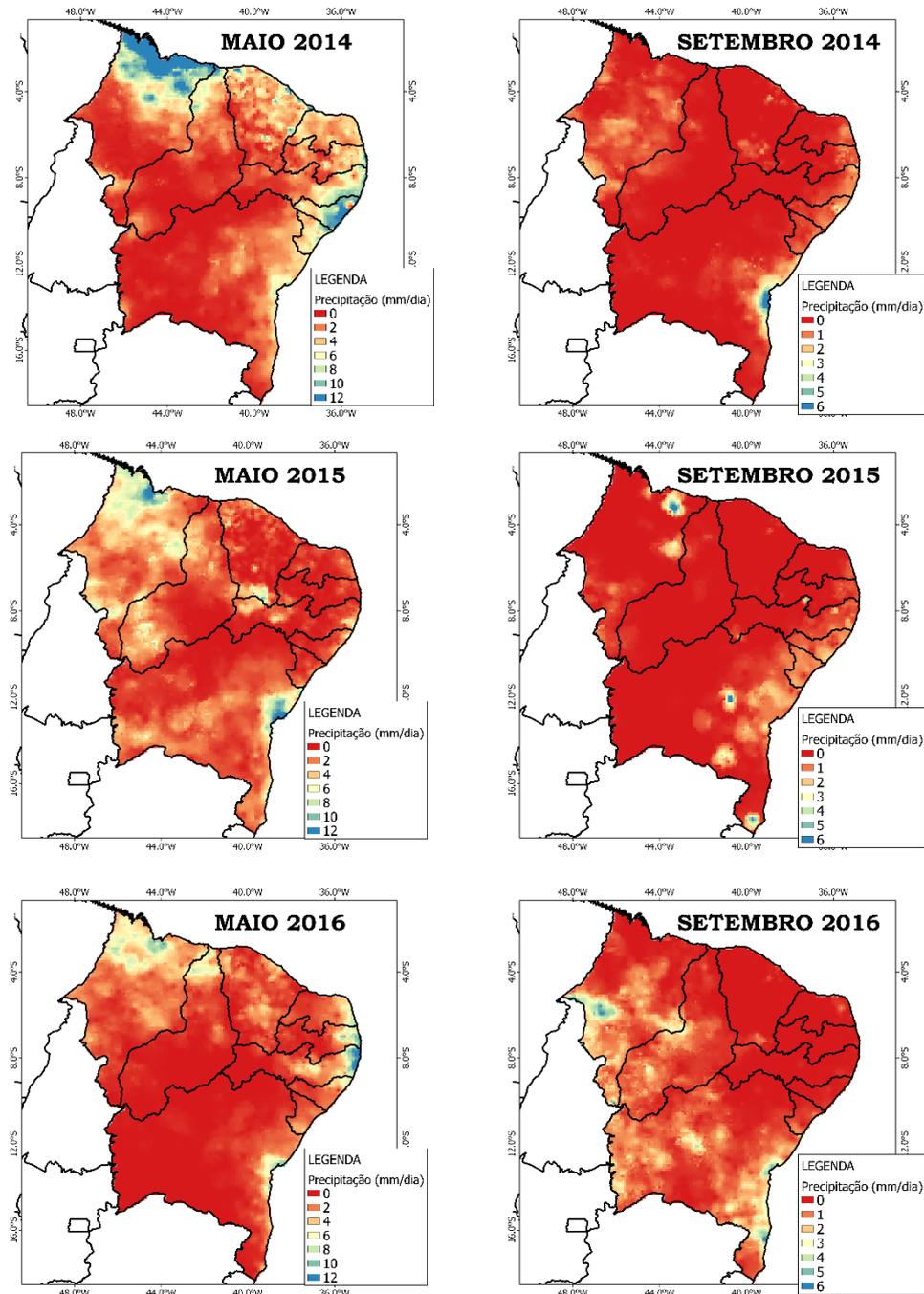
As imagens com a espacialização dos valores de precipitação estão dispostas na Figura 16, é importante salientar que os dados expostos são a média de 16 dias, correspondente ao intervalo de TVDI. À direita estão os intervalos de precipitação para maio, com cores de vermelho a azul, definidas entre 0 e 12 mm/dia (o azul representa valores exatos e maiores que 12 mm/dia), à esquerda, os valores de setembro estão definidos entre 0 e 6 mm/dia.

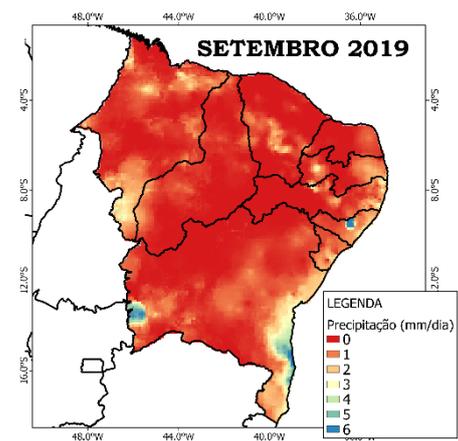
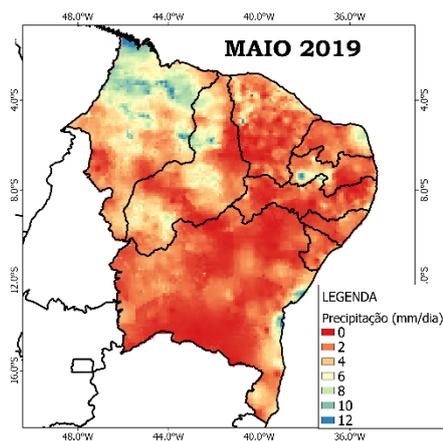
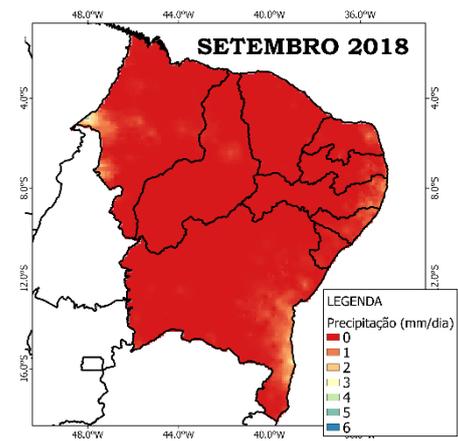
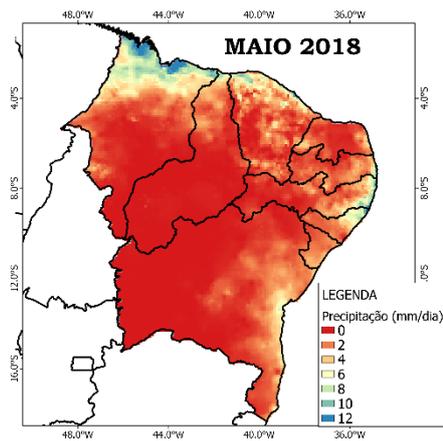
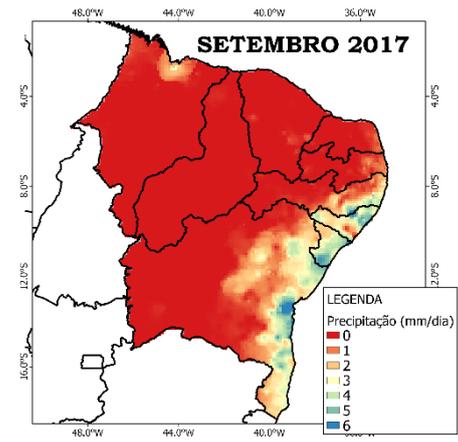
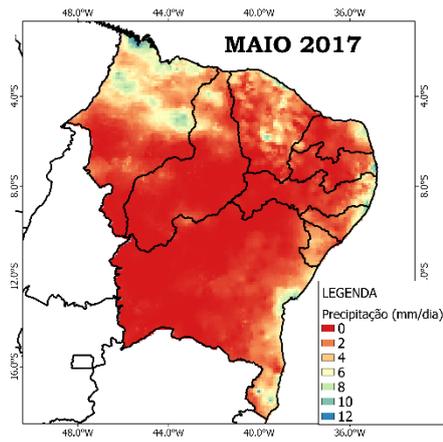
De acordo com FUNCEME *et al.* (2016), a precipitação do mês de maio concentrou-se no centro-norte do Maranhão, extremo norte do Piauí e do Ceará. Além disso, também ocorrem chuvas significativas na Zona da Mata, entre o Rio Grande do Norte e o Recôncavo baiano. Nota-se que nos meses de maio da Figura 28, a precipitação concentrou-se numa seção que coincide com a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), passando além dos estados Maranhão, Ceará e Piauí, concentrando precipitação também no Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e o litoral da Bahia. Maio de 2014 destacou-se como o ano com maior frequência de chuva acima de 12 mm/dia, concentrando-se no norte do Maranhão e no litoral de Alagoas. O ano de 2019 foi o com maior frequência de valores entre 6 e 10 mm/dia, distribuídos pelo NEB.

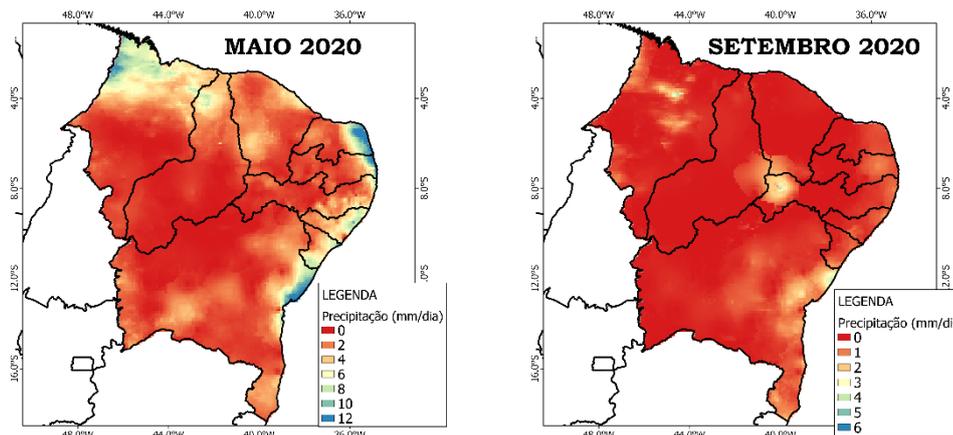
De acordo com FUNCEME *et al.* (2016), a climatologia da região indica maiores níveis de chuva entre o litoral de Pernambuco e da Bahia para o mês de setembro. Os dados de precipitação demonstraram a prevalência de chuva no referido setor do Nordeste nos anos de 2014, 2015, 2017, 2019 e 2020. Além desta região, também se observou a ocorrência de

precipitação no intervalo de 3 a 6 mm/dia. Em 2014, houve valores baixos (1 a 3 mm/dia) no Maranhão e pequenas porções do norte e do sul cearense, na seção norte do Maranhão em 2015. Já em 2016, não houve precipitação expressiva nos estados de Pernambuco, Alagoas e Sergipe.

Figura 28 – Média de precipitação para maio e setembro – 2014 a 2020







Fonte: Adaptado de FUNCEME (2021).

6.5 Monitor de Secas versus TVDI

As Figuras 29 a 41 apresentam a comparação visual entre o TVDI estimado e o shapefile do Monitor de Secas para os meses específicos de maio e setembro, com exceção para o ano de 2014 que teve a estimativa implementada apenas no seu segundo semestre. A legenda do Monitor diz respeito a 6 categorias, com o branco significando Sem Seca Relativa, amarelo 0, S0 (seca fraca), salmão - S1 (seca moderada), laranja - S2 (seca grave), vermelho - S3 (seca extrema) e vinho - S4 (seca excepcional). É importante ressaltar que o Monitor de Secas utiliza índices de precipitação, junto com dados auxiliares ao longo do mês para traçar os shapes e o TVDI foi calculado com dados de satélite em formato GeoTiff, com intervalo de 16 dias para cada mês.

6.5.1 Monitor vs TVDI de 2014

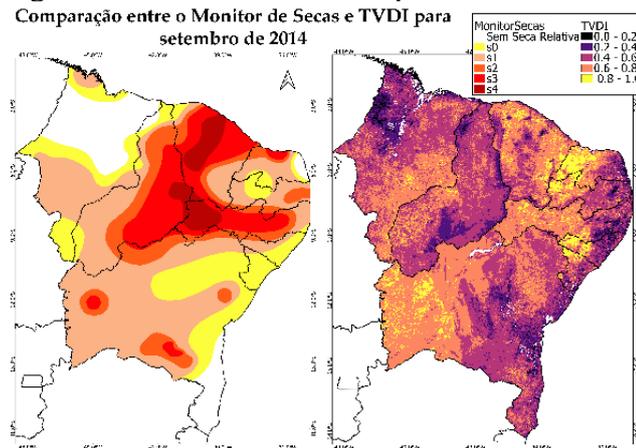
Em 2014, observou-se que a porção centro-norte maranhense, o leste potiguar e a região sul da Bahia, não apresentaram seca relativa no shapefile e o TVDI indicou valores entre úmidos (0.2-0.4) e balanceados (0.4-0.6), para os três locais. Isso se deve às chuvas acima do normal em locais isolados do Maranhão ao considerar o mês inteiro e o leste do Rio Grande do Norte com o sul da Bahia, por serem locais que climatologicamente apresentam maior volume de chuvas nesse mês (FUNCEME *et al.*, 2014).

O estado do Piauí obteve valores de seca grave e excepcional, devido à baixa precipitação e alta taxa de evapotranspiração neste mês (FUNCEME *et al.*, 2014), enquanto no TVDI, os valores concentraram-se entre úmidos e balanceados, havendo pixels secos na região

do leste piauiense, onde o monitor considerou a seca moderada, demonstrando diferenças na espacialização.

No Ceará, o monitor apontou todo o estado variando de seca fraca a seca excepcional e o índice indicou maior frequência de pixels secos. Alguns locais, como os enclaves úmidos, apresentaram valores de pixels úmidos e balanceados. Para Pernambuco, o monitor indicou Seca Extrema e Excepcional a partir do agreste deste estado, e o TVDI obtido demonstrou pixels considerados secos (0.6-0.8) nas regiões do Sertão e São Francisco pernambucano.

Figura 29 – Monitor vs TVDI para maio de 2014
 Comparação entre o Monitor de Secas e TVDI para setembro de 2014

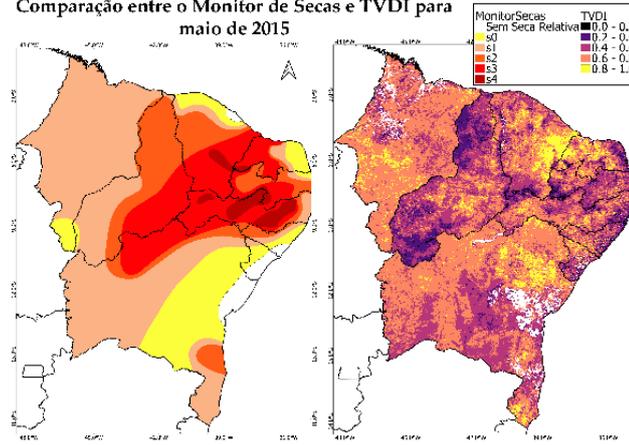


Fonte: Elaborado pela autora.

6.5.2 Monitor vs TVDI de 2015

Em maio de 2015, se observou que o monitor indicou seca para quase todo o Nordeste, com exceção da Região Metropolitana de Fortaleza no Ceará, do recôncavo baiano, o leste sergipano e uma pequena porção do leste alagoano. Enquanto isso, os valores do TVDI nestes locais variaram de úmidos, como em Alagoas, Ceará e Sergipe a valores balanceados/secos na Bahia, sendo importante destacar que neste ano há uma maior área do estado baiano com pixels sem valor nesta região.

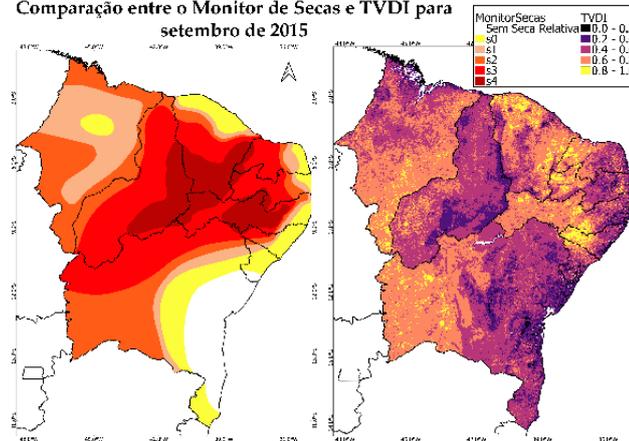
Figura 30– Monitor vs TVDI para maio de 2015
 Comparação entre o Monitor de Secas e TVDI para maio de 2015



Fonte: Elaborado pela autora

Em setembro, a seca se agravou e expandiram-se os valores de seca grave, extrema e excepcional, enquanto o sul-sudeste baiano e parte fronteiriça do leste sergipano passaram a ser considerados Sem Seca Relativa. O TVDI estimado na mesma região destes estados apresentou valores úmidos e balanceados. O Piauí foi o estado que demonstrou maior diferença entre os valores do monitor e do índice, já que apresentou pixels com intervalos baixos de TVDI em quase toda sua extensão.

Figura 31– Monitor vs TVDI para setembro de 2015
 Comparação entre o Monitor de Secas e TVDI para setembro de 2015



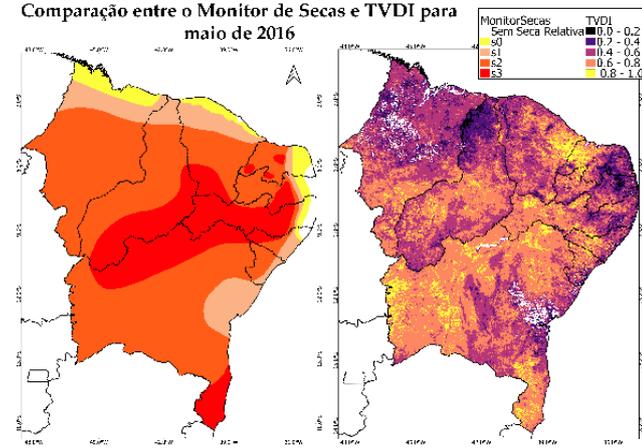
Fonte: Elaborado pela autora.

6.5.3 Monitor vs TVDI de 2016

Em maio de 2016, houve a prevalência de áreas com seca grave e extrema, contando apenas com parte do leste potiguar, leste paraibano, pernambucano e pequena parte do leste de Sergipe sendo considerados Sem Seca Relativa. O TVDI nessa área manteve-se com valores

muito úmidos/úmidos. O extremo sul da Bahia destaca-se neste mês por apresentar seca extrema, com o TVDI marcando valores secos/muito secos.

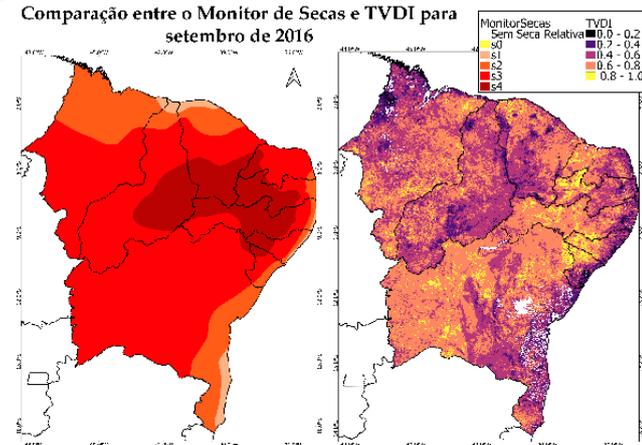
Figura 32 – Monitor vs TVDI de para maio de 2016
 Comparação entre o Monitor de Secas e TVDI para maio de 2016



Fonte: Elaborado pela autora.

Em setembro, a seca extrema espalhou-se e não houve locais Sem Seca Relativa ou de Seca Fraca. A seca excepcional concentrou-se entre o centro-sul piauiense e cearense, junto do oeste potiguar, paraibano, pernambucano, alagoano e, em menor proporção, sergipano. Os valores de TVDI nesta área, tanto para Piauí quanto Ceará permaneceram entre balanceados e secos, com o segundo tendo maior frequência no Ceará, com a região próxima ao Rio Grande do Norte. Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe apresentaram maior frequência de pixels secos/muito secos.

Figura 33 – Monitor vs TVDI de para setembro de 2016
 Comparação entre o Monitor de Secas e TVDI para setembro de 2016

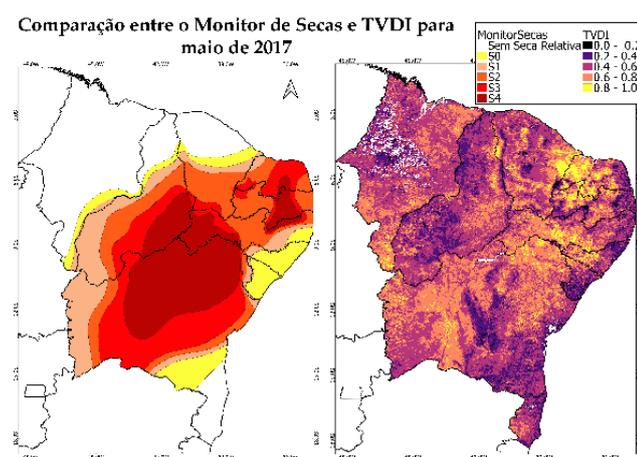


Fonte: Elaborado pela autora.

6.5.4 Monitor vs TVDI de 2017

Em maio de 2017, percebe-se o contraste em relação ao ano anterior, apresentando mais regiões Sem Seca Relativa, abrangendo o Maranhão quase todo, o norte do Piauí e do Ceará, além do sul da Bahia. Os pixels úmidos e balanceados prevalecem nessas regiões, havendo alguns pixels secos no leste maranhense. O oeste de Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe também apareceu marcado com pixels úmidos, enquanto a região do Jaguaribe cearense e oeste potiguar concentraram valores muito secos.

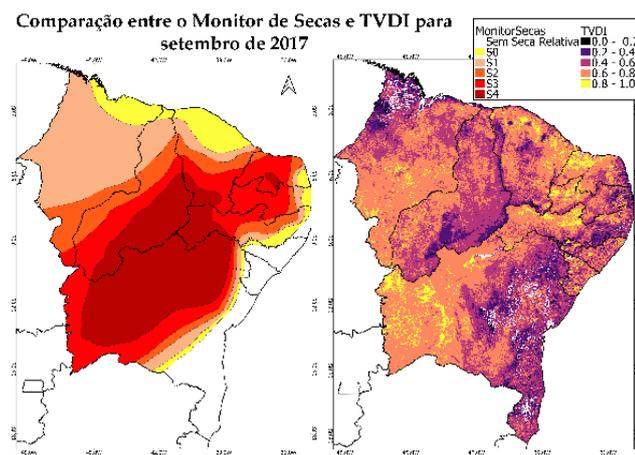
Figura 34 – Monitor vs TVDI para maio de 2017



Fonte: Elaborado pela autora.

Em setembro, a área Sem Seca Relativa prevaleceu no centro-sul baiano, nos estados de Sergipe e Alagoas e parte da Zona da Mata Pernambucana. Os valores de TVDI para essa área na Bahia foram variaram de balanceados/úmidos a secos (parte do centro-sul baiano), já os de Sergipe e Alagoas apresentaram maior frequência de pixels secos, enquanto a porção de Pernambuco obteve valores baixos, entre úmidos e balanceados.

Figura 35 – Monitor vs TVDI para setembro de 2017



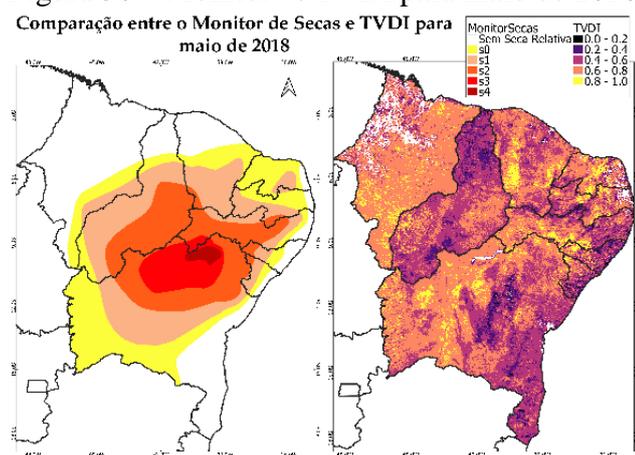
Fonte: Elaborado pela autora.

6.5.5 Monitor vs TVDI de 2018

Em maio, o monitor delimitou o Maranhão (exceto sudeste do estado), o norte do Piauí e do Ceará Sem Seca Relativa, além da região sul-sudeste da Bahia, estendendo-se pelo leste de Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. Toda a extensão maranhense apresentou-se com maior frequência de valores secos de TVDI, enquanto o norte piauiense manteve seus pixels balanceados/úmidos e o Ceará teve variações entre pixels muito secos e úmidos, com maior frequência do intervalo seco (0.6-0.8).

Na porção leste dos estados Rio Grande do Norte e Paraíba, o TVDI estimado concentrou-se em intervalos secos e muito secos. Do litoral pernambucano ao sul da Bahia, os valores de maior frequência foram balanceados/úmidos (0.2-0.4 e 0.4-0.6).

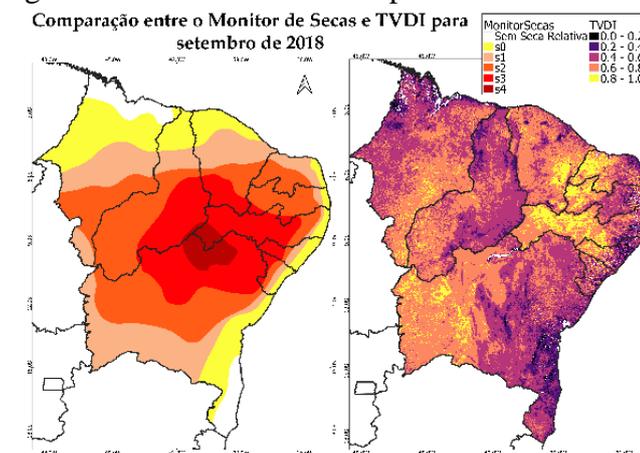
Figura 36 – Monitor vs TVDI para maio de 2018



Fonte: Elaborado pela autora.

Em setembro, as áreas Sem Seca Relativa restringiram-se ao norte maranhense e parte do sul baiano. Os pixels do Maranhão, diferente do mês de maio, apresentaram valores de TVDI balanceados/úmidos em maior proporção que os pixels secos. O sul da Bahia apresentou, principalmente, valores úmidos/balanceados, condizendo em parte com os dados do Monitor de Secas.

Figura 37 – Monitor vs TVDI para setembro de 2018



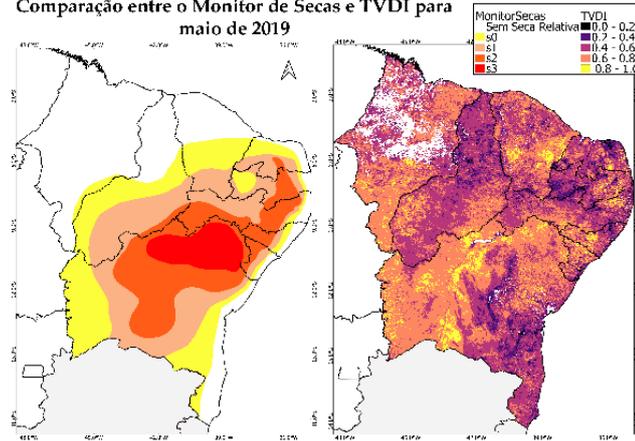
Fonte: Elaborado pela autora.

6.5.6 Monitor vs TVDI de 2019

No mês de maio, as áreas Sem Seca Relativa circundaram o Maranhão, norte do Piauí, Ceará e pequena porção do norte potiguar, passando pelo leste do Rio Grande do Norte até parte do sul baiano. O índice apontou pixels sem valores atribuídos (brancos ao longo do Maranhão), com frequência predominante de valores secos, seguidos por valores balanceados espalhados entre as regiões leste e oeste.

No Piauí, valores balanceados e úmidos prevaleceram. no Ceará, os intervalos balanceado e seco destacaram-se, do Rio Grande do Norte à Alagoas, percebeu-se a maior frequência de valores úmidos. Já para a área sergipana, houve a maior frequência de pixels secos/muito secos, enquanto a Bahia apresentou maior frequência de pixels secos da fronteira com Sergipe até o recôncavo baiano, apresentando prevalência de valores balanceados e úmidos abaixo desta região, até o sul do estado.

Figura 38 – Monitor vs TVDI para maio de 2019
 Comparação entre o Monitor de Secas e TVDI para maio de 2019

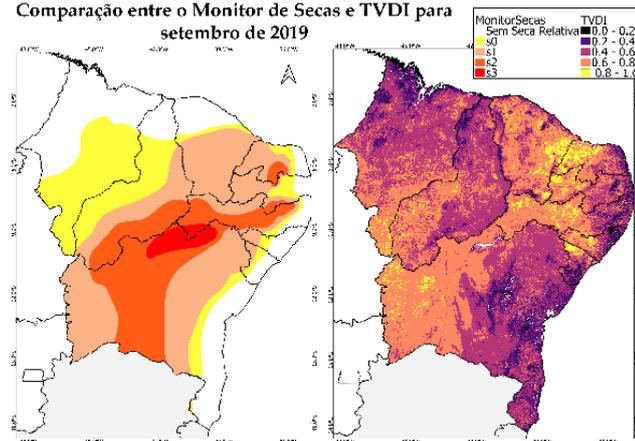


Fonte: Elaborado pela autora.

Em setembro, as áreas Sem Seca Relativa diminuíram para Maranhão, Piauí e Ceará, enquanto do Rio Grande do Norte à Bahia se expandiram. Maranhão e Piauí apresentaram maior frequência dos pixels balanceados e úmidos em suas porções centro-norte. No Ceará, pixels secos prevaleceram, com apenas pequenas regiões apresentando valores úmidos.

Do leste potiguar ao leste alagoano, predominaram valores úmidos e balanceados, chegando a apresentar o intervalo muito úmido (0.0-0.2). Parte do agreste alagoano e do sertão sergipano apresentaram valores secos/muito secos, enquanto o leste de Sergipe apresentou valores úmidos/muito úmidos e balanceados. Na Bahia, do Vale São-Francisco, mais ao norte até o sul baiano, observou-se os valores de muito úmido a balanceados, prevalecendo os de 0.4 a 0.6 (balanceados).

Figura 39 – Monitor vs TVDI para setembro de 2019
 Comparação entre o Monitor de Secas e TVDI para setembro de 2019



Fonte: Elaborado pela autora.

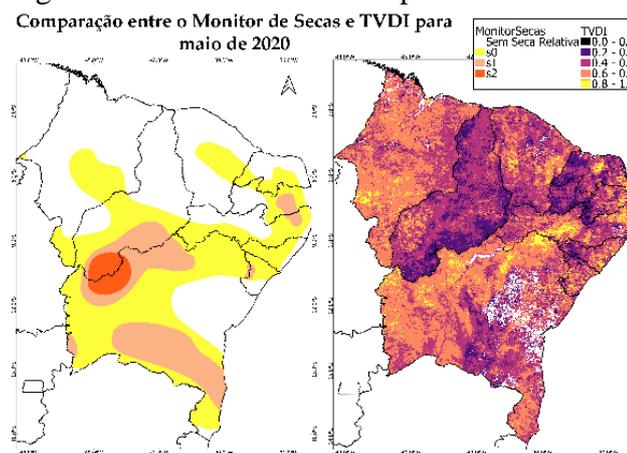
6.5.7 Monitor vs TVDI de 2020

Para o mês de maio, as áreas Sem Seca Relativa percorreram grande parte do Maranhão, apresentando apenas seca fraca no centro/leste do estado, no sul e em uma pequena parcela no oeste, fronteira com Tocantins. O centro-norte piauiense e parte do sudoeste também se apresentaram sem seca. No Ceará, apenas uma parte apresentou seca fraca, passando pelo Jaguaribe, norte, noroeste e sertões, com o restante do estado mantendo-se sem seca.

No Rio Grande do Norte, apenas parte do agreste, centro e oeste potiguar apresentaram seca fraca, já na Paraíba e em Pernambuco, o leste e parte do sertão dos estados não apresentaram seca. O leste alagoano também se manteve sem seca. Em Sergipe, parte do leste e do agreste apresentou-se sem seca, na fronteira com a Bahia. O território baiano apresentou a mesma classificação de sua porção nordeste até parte do sul, que obteve valores de seca fraca e moderada, voltando a apresentar o extremo sul com uma pequena área Sem Seca Relativa.

Com relação ao TVDI de maio, os valores do Maranhão foram, em maioria, secos. Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas apresentaram maior frequência de pixels balanceados e úmidos, com a distribuição de pixels secos/muito secos em partes do leste dos estados. Parte do São Francisco pernambucano destacou-se com pixels muito secos marcados, enquanto Sergipe apresentou maior frequência de pixels balanceados, seguidos por secos em sua extensão. Na Bahia, o intervalo seco destacou-se, seguido pelo balanceado, contando ainda, com pixels sem valor (brancos), indicando a maior presença de nuvens na região que o monitor indicou Sem Seca Relativa.

Figura 40 – Monitor vs TVDI para maio de 2020

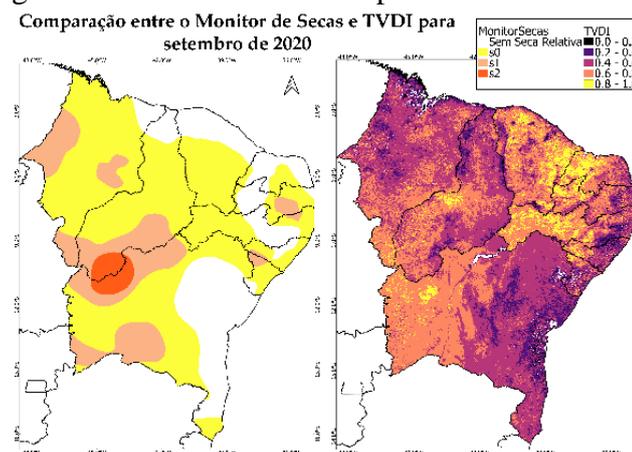


Fonte: Elaborado pela autora.

Em setembro, o monitor apontou as áreas Sem Seca Relativa em parte do centro e leste maranhense, passando pelo norte piauiense e cearense. Além do norte/leste potiguar e paraibano, essas áreas adentraram o agreste do Rio Grande do Norte, o sertão paraibano, o sertão pernambucano e parte do agreste/leste alagoano. Para Sergipe, apenas partes do agreste e do leste, fronteiriças com a Bahia foram delimitadas sem seca, enquanto na Bahia, distribuiu-se pelo nordeste baiano, centro-norte, parte do centro-sul e do sul do estado, com o extremo sul destacando-se com seca fraca.

O TVDI do Maranhão apresentou com maior frequência os intervalos seco e balanceado, inclusive na região leste/norte fronteira com o Piauí. O norte piauiense permaneceu com destaque nos pixels balanceados e úmidos, já o Ceará destacou-se com maior quantidade de pixels secos/muito secos. Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas apresentaram pixels balanceados/úmidos em sua porção leste, com a predominância de pixels secos/muito secos nas demais regiões interiores. As regiões do leste e agreste de Sergipe até o sul da Bahia apresentaram maior frequência de pixels balanceados e úmidos.

Figura 41 – Monitor vs TVDI para setembro de 2020



Fonte: Elaborado pela autora.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As imagens de satélites, por sua alta resolução temporal e espacial, possibilitam a geração de produtos geofísicos especializados que permitem, quando utilizado pelos tomadores de decisão, monitorar, prever e tomar ações mitigadoras quando há ocorrência de eventos extremos de seca, como aqueles que, com certa frequência, ocorrem na região Nordeste do Brasil, nossa área de estudos.

Com as análises, se observou semelhança em alguns anos, entre os valores úmidos/balanceados (0.2-0.4 e 0.4-0.6) de TVDI e a delimitação de locais Sem Seca Relativa no Monitor de Secas. Também se destaca que os valores muito secos (0.8-1.0) de TVDI coincidiram com áreas marcadas como seca no Monitor de Secas. Este índice demonstra potencial para ser aplicado no monitoramento do estresse hídrico no semiárido e incorporado aos dados usados pelo site do Monitor, contribuindo na manutenção e aperfeiçoamento deste projeto.

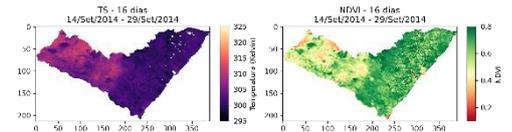
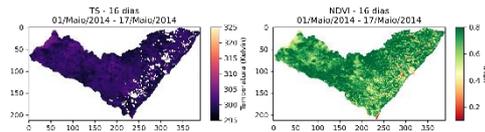
As análises do TVDI, gerados a partir das imagens MODIS mostraram, quando comparados aos dados de umidade gerados a partir das imagens SMOS, semelhanças, principalmente no mês de setembro, apesar das resoluções espaciais diferirem. Os resultados indicam a necessidade de trabalhos futuros utilizando uma resolução espacial menor nos dados SMOS (43 ou 24 km), em conjunto com o TVDI degradado para a mesma resolução. Assim, é sugerido analisar sua correlação estatisticamente.

APÊNDICE A – IMAGENS DE NDVI E TS PARA CADA ESTADO

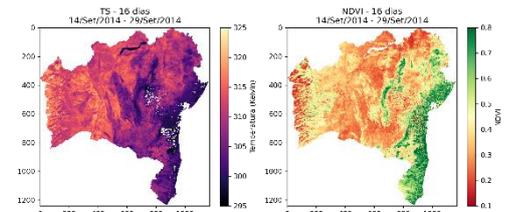
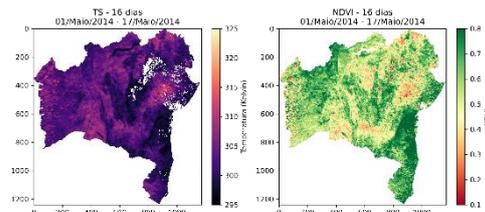
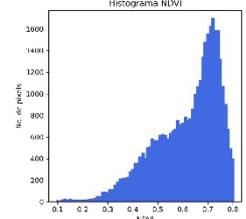
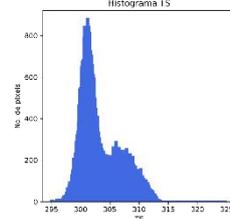
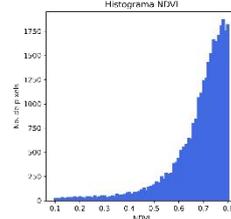
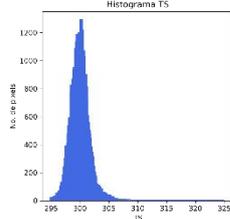
Este apêndice contém todas as imagens de NDVI e Ts usadas para os meses de maio e setembro, no intervalo de anos de 2014 a 2020 para estimar o TVDI. Cada estado teve suas imagens plotadas após multiplicação pelo fator de escala, com seus respectivos histogramas mostrando a frequência dos seus valores.

MAIO

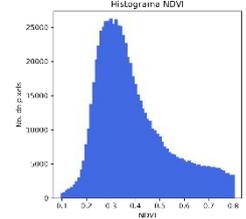
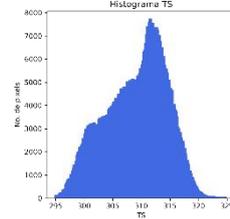
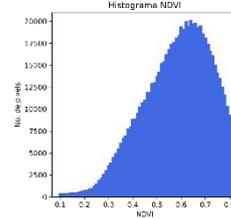
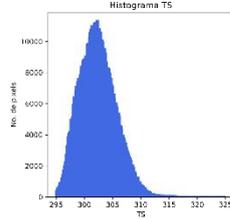
SETEMBRO



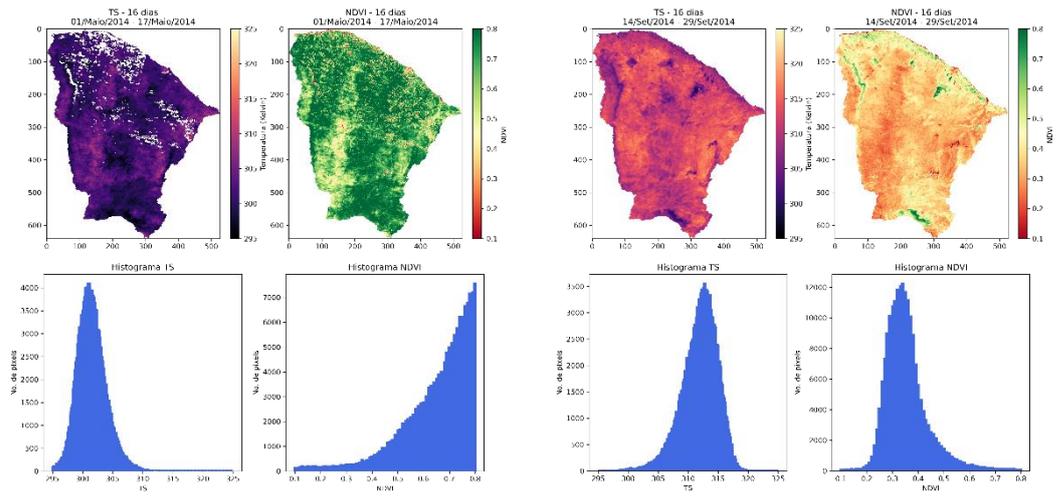
AL/2014



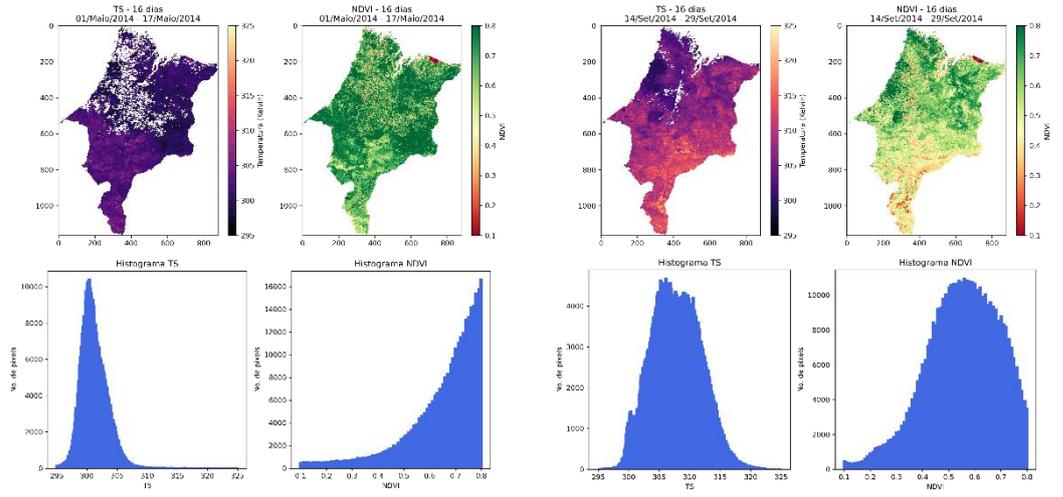
BA/2014



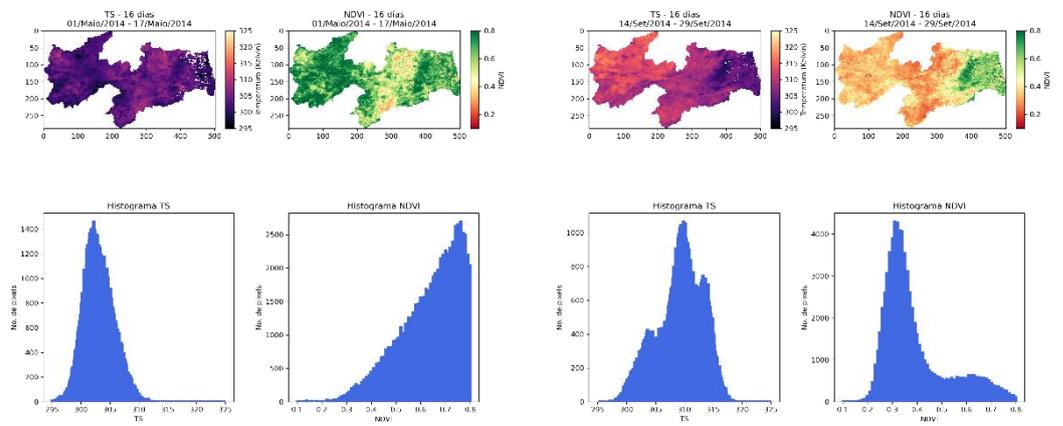
CE/2014

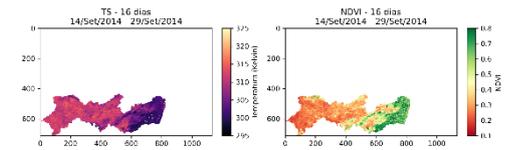
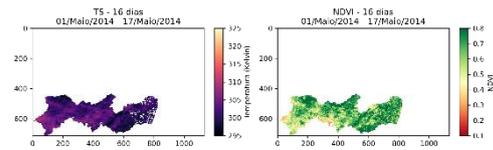


MA/2014

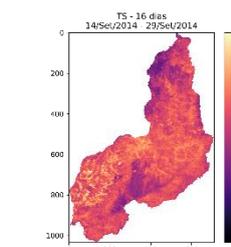
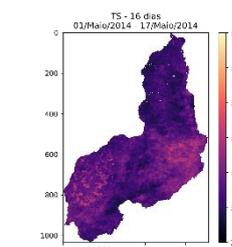
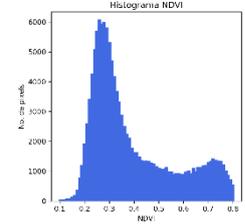
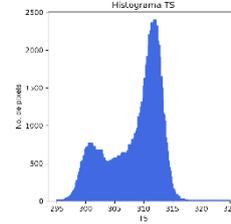
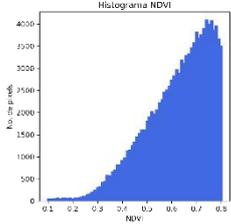
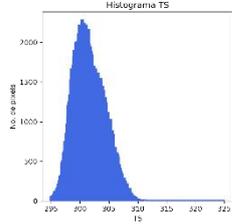


PB/2014

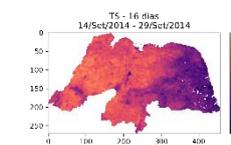
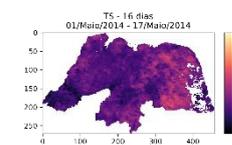
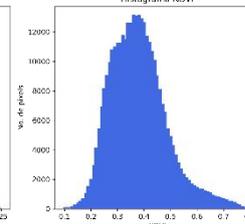
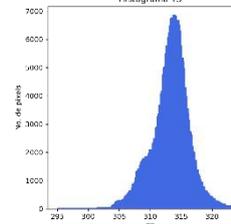
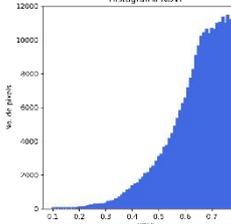
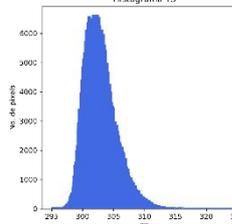




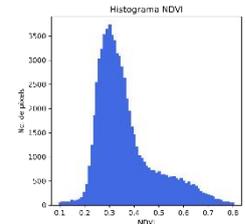
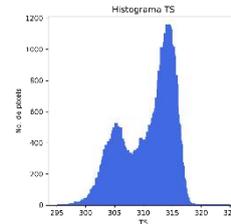
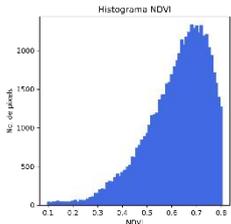
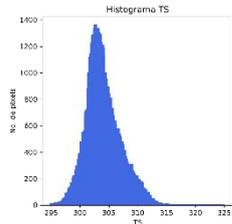
PE/2014



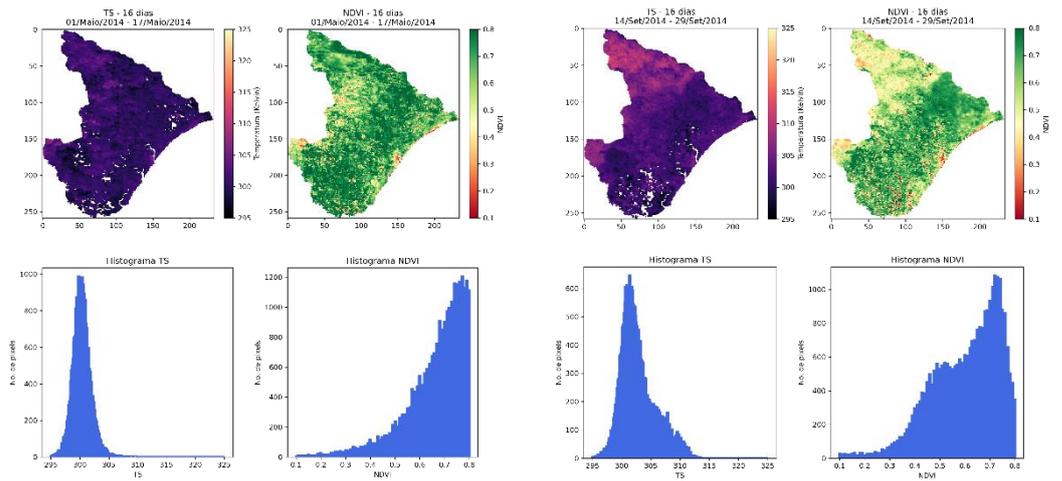
PI/2014



RN/2014



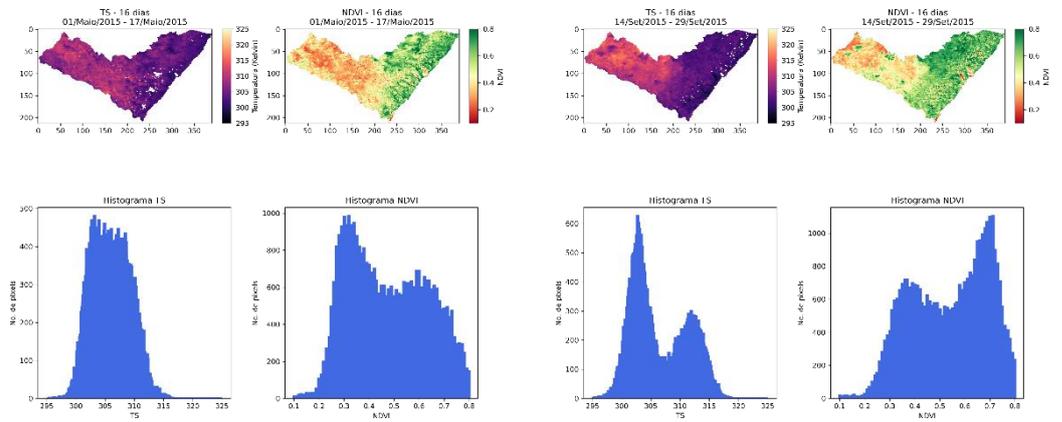
SE/2014



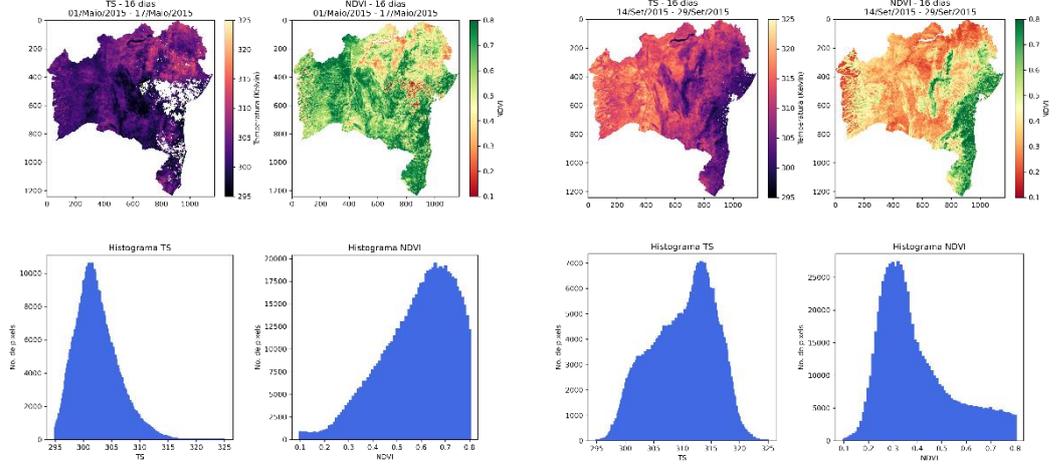
MAIO

SETEMBRO

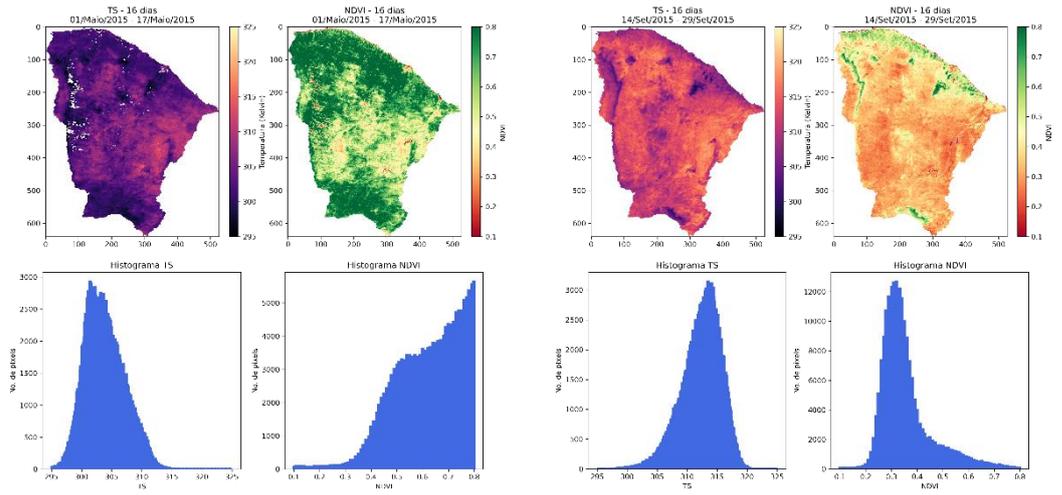
AL/2015



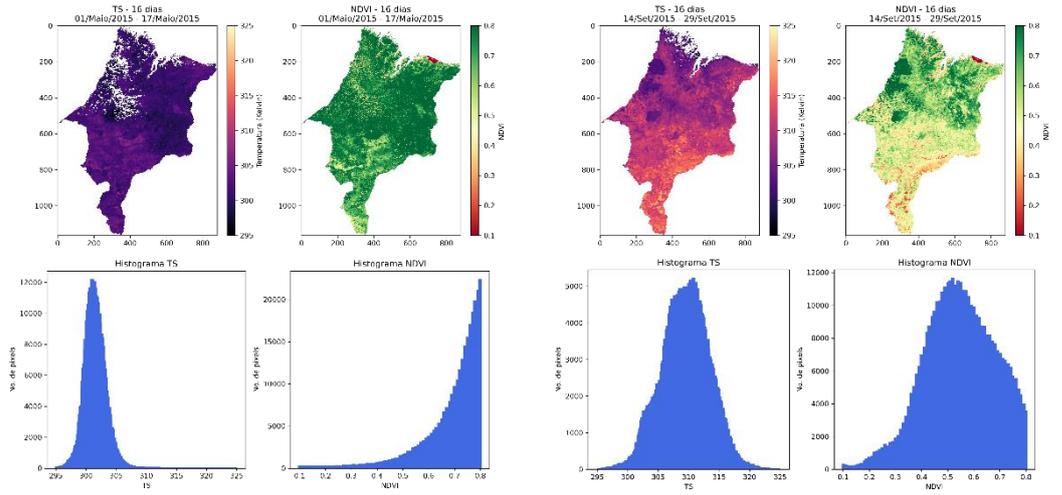
BA/2015



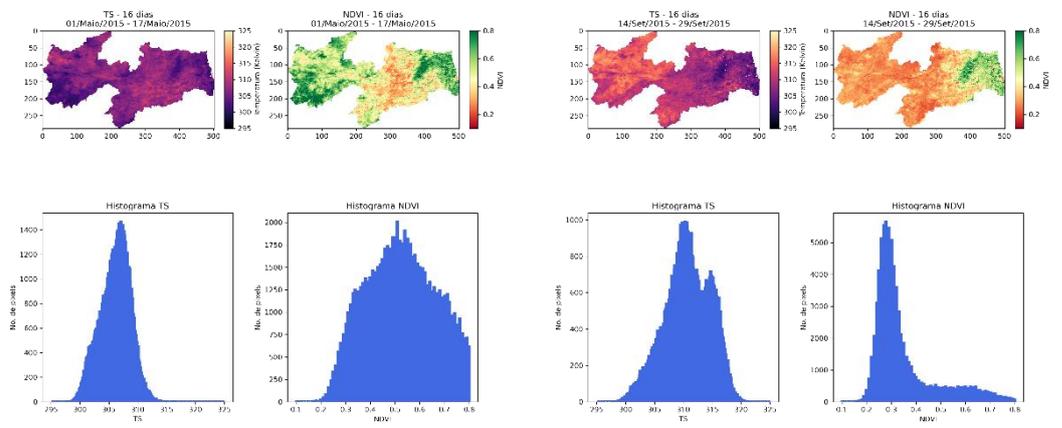
CE/2015

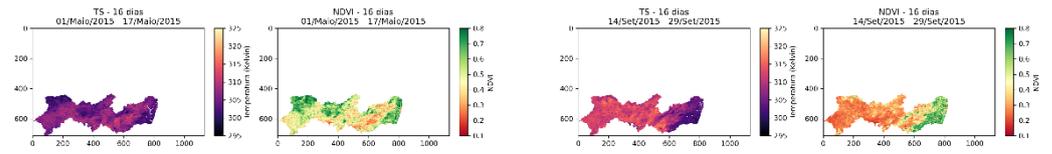


MA/2015

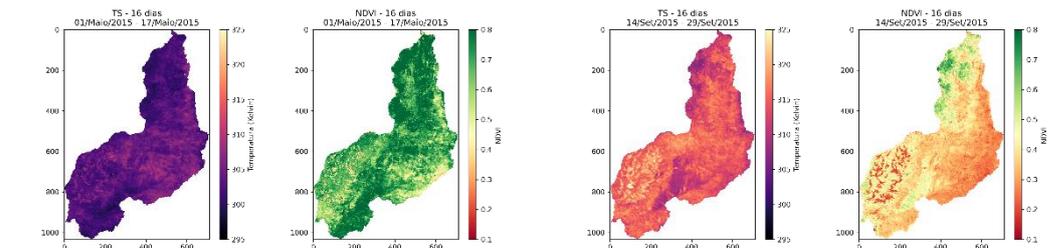
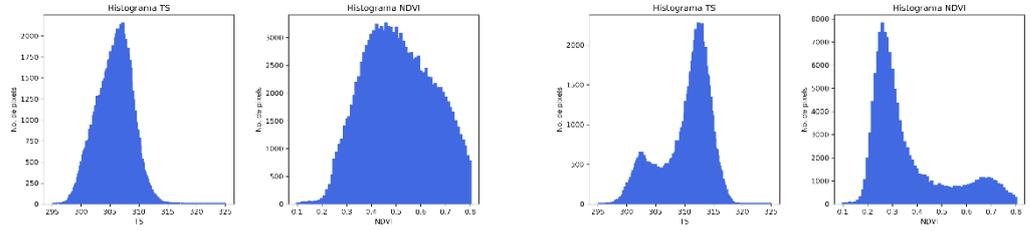


PB/2015

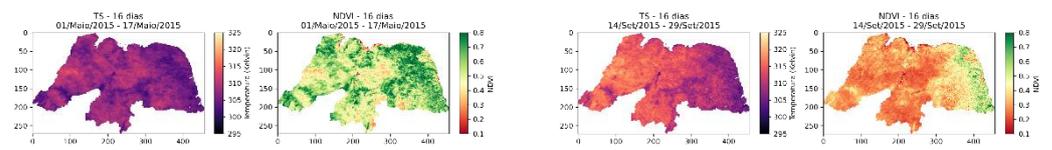
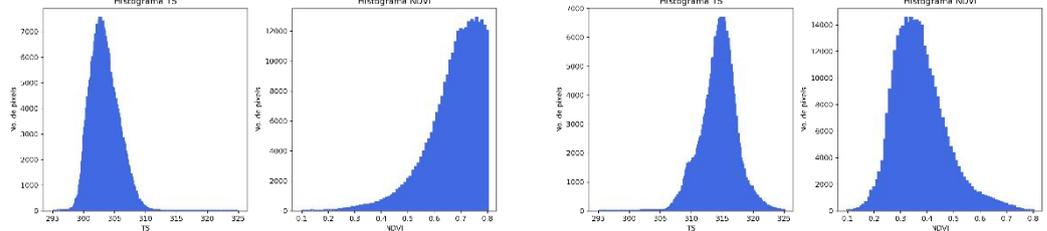




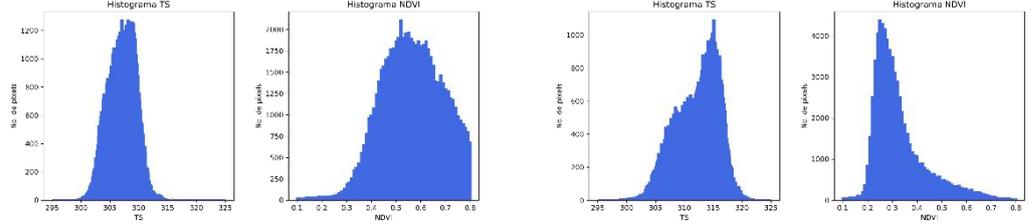
PE/2015



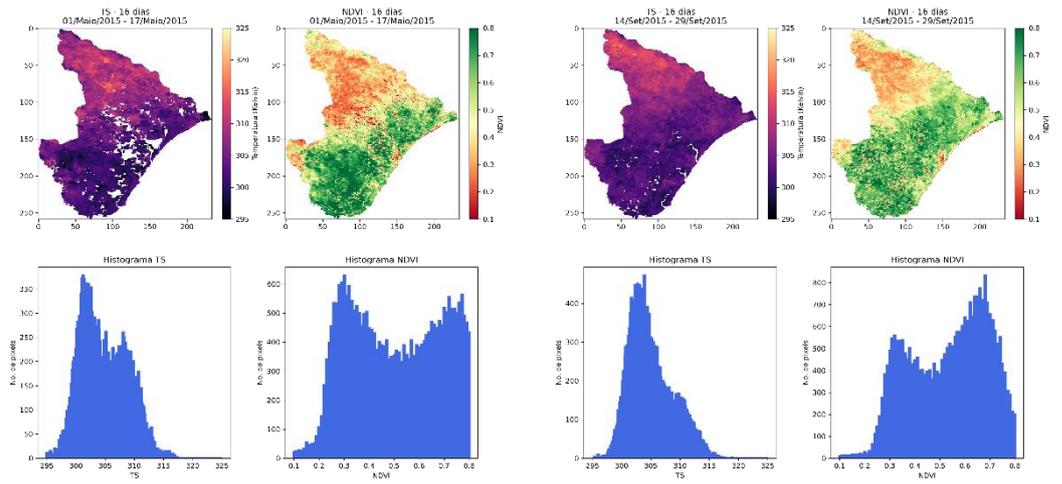
PI/2015



RN/2015



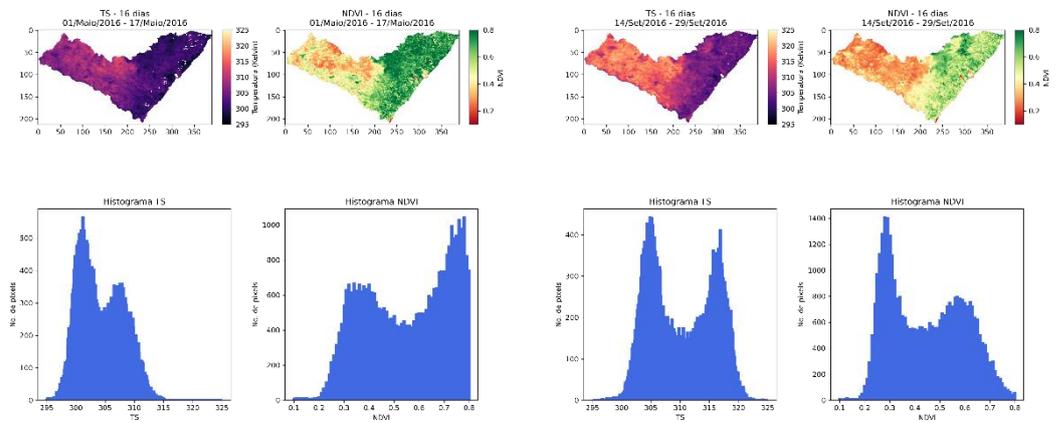
SE/2015



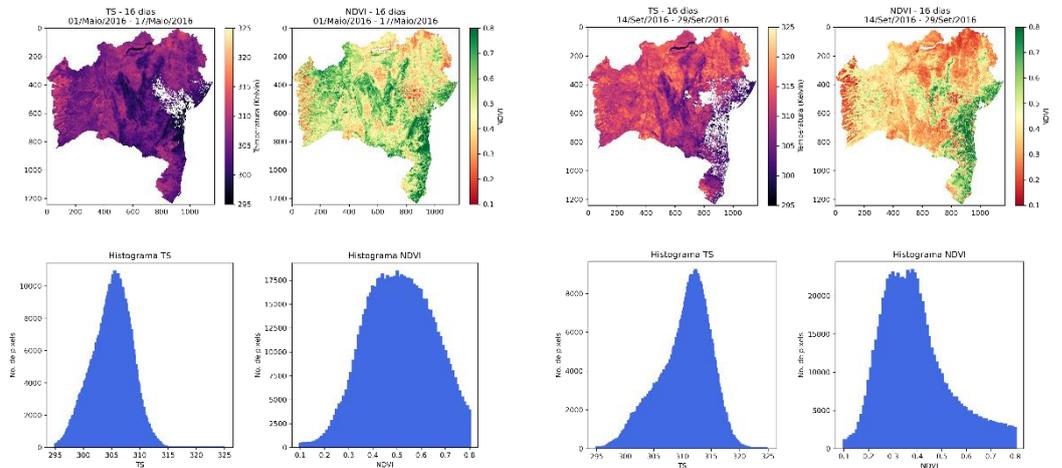
MAIO

SETEMBRO

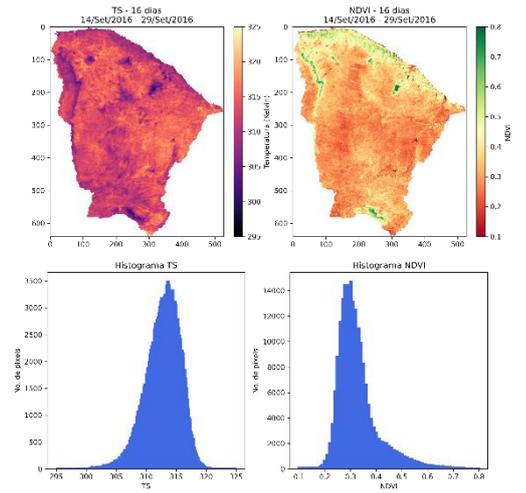
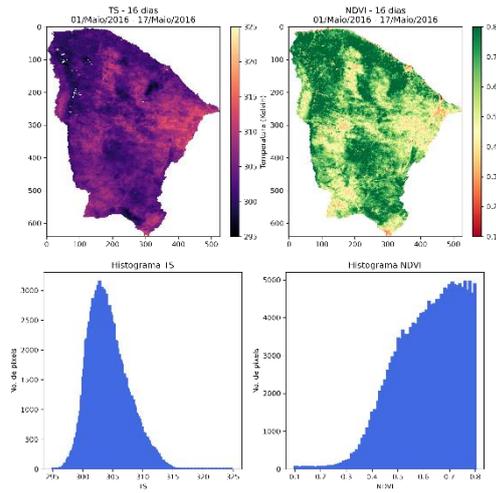
AL/2016



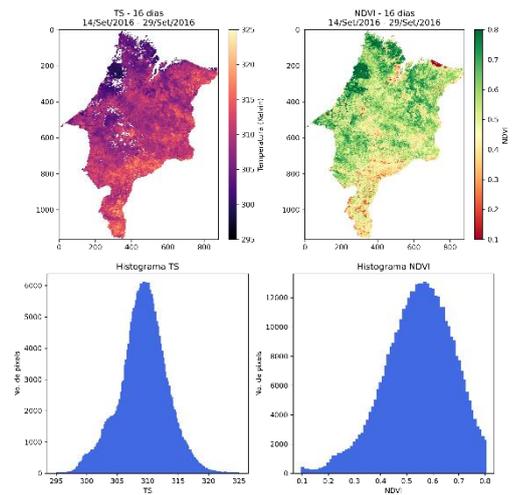
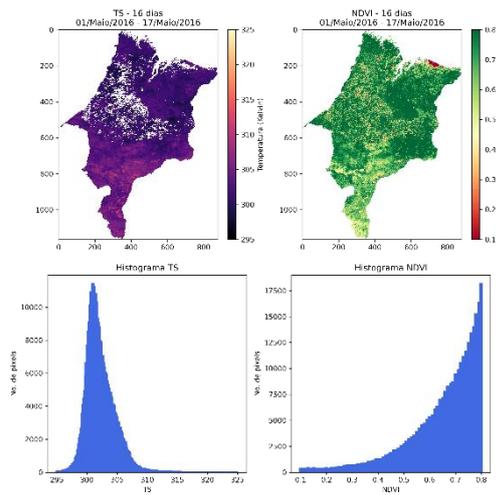
BA/2016



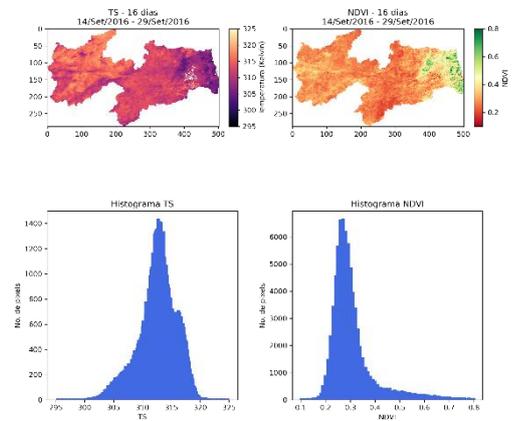
CE/2016



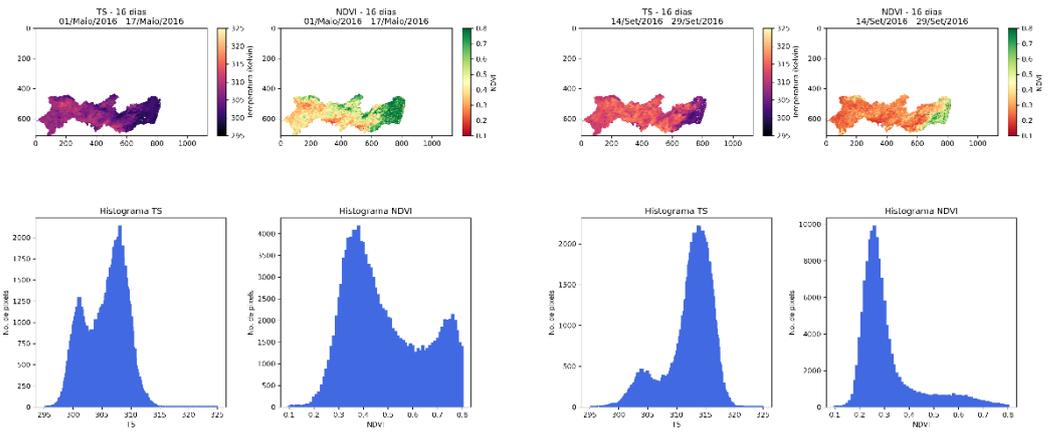
MA/2016



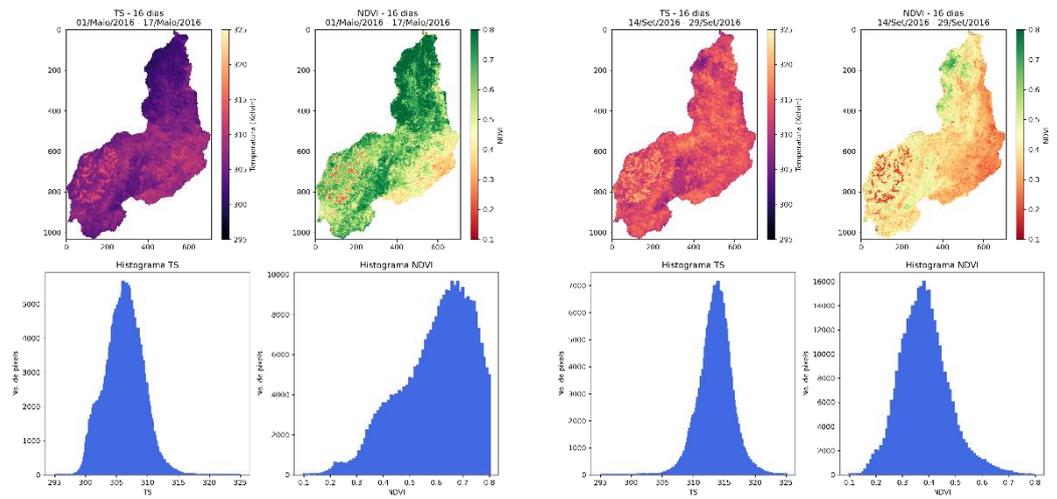
PB/2016



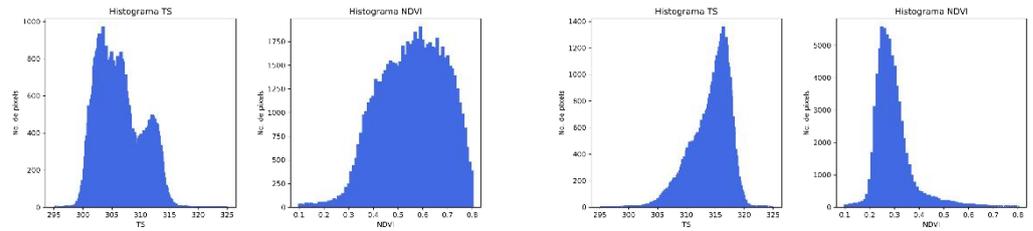
PE/2016



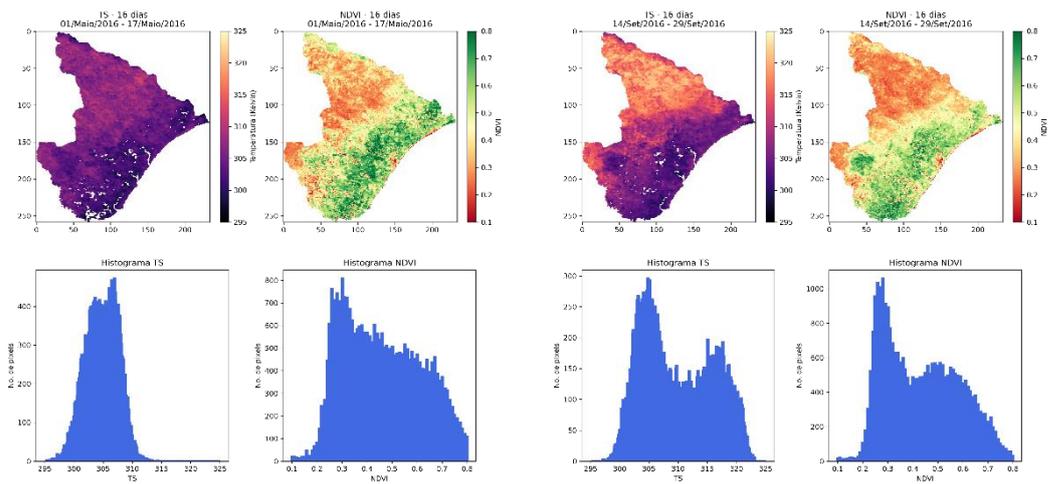
PI/2016



RN/2016



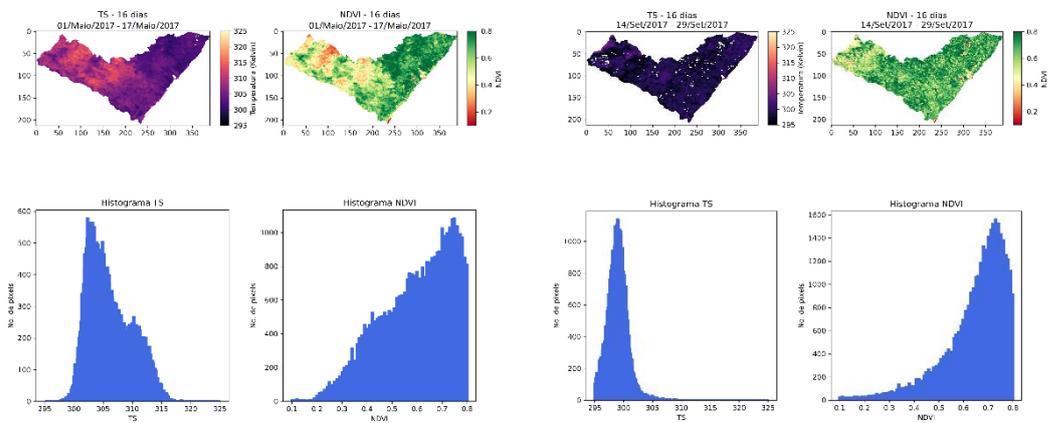
SE/2016



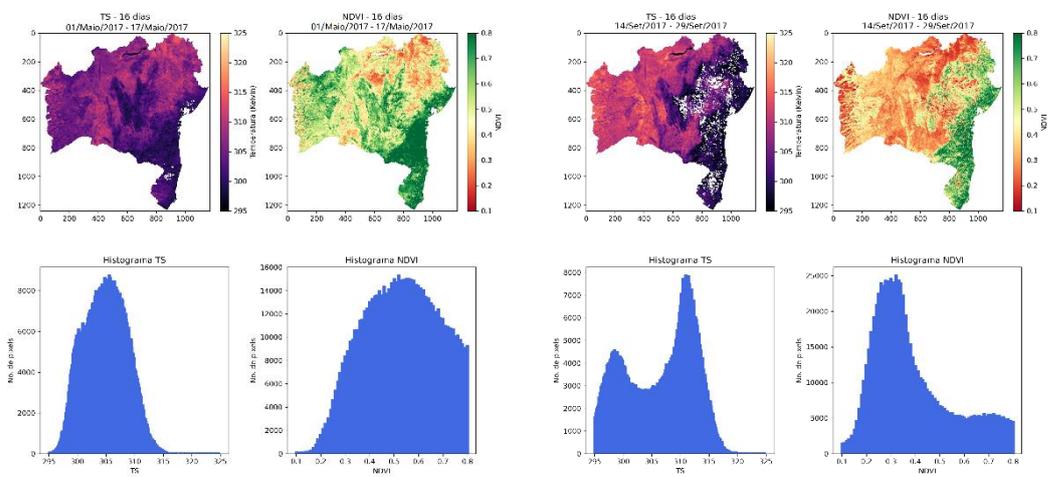
MAIO

SETEMBRO

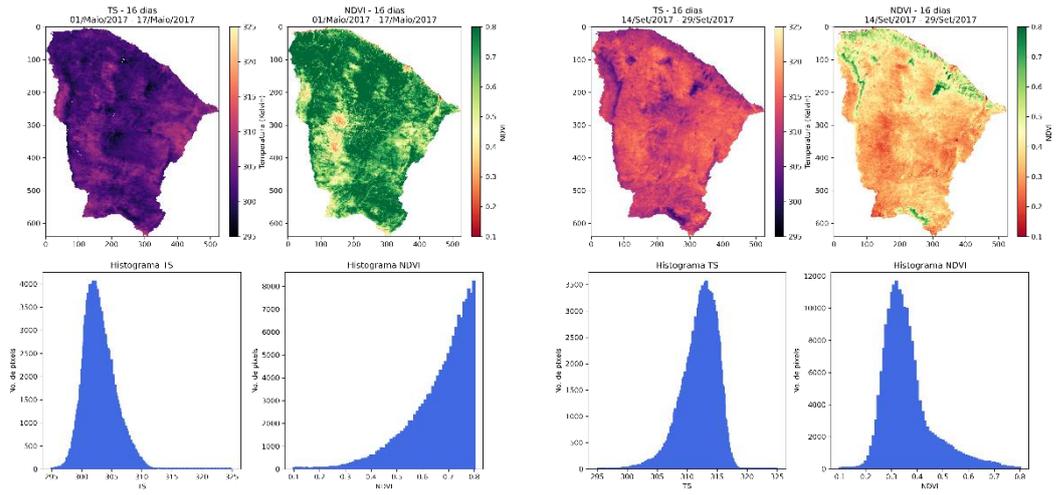
AL/2017



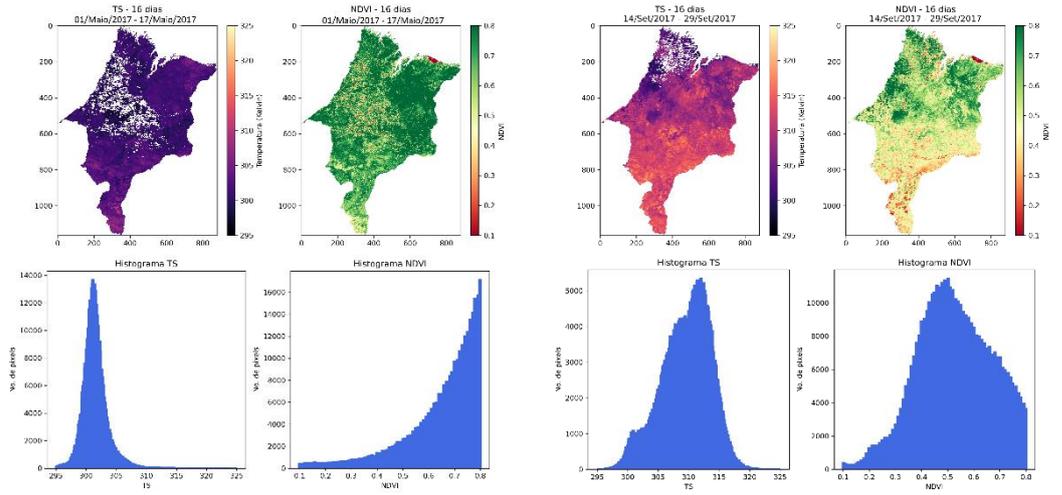
BA/2017



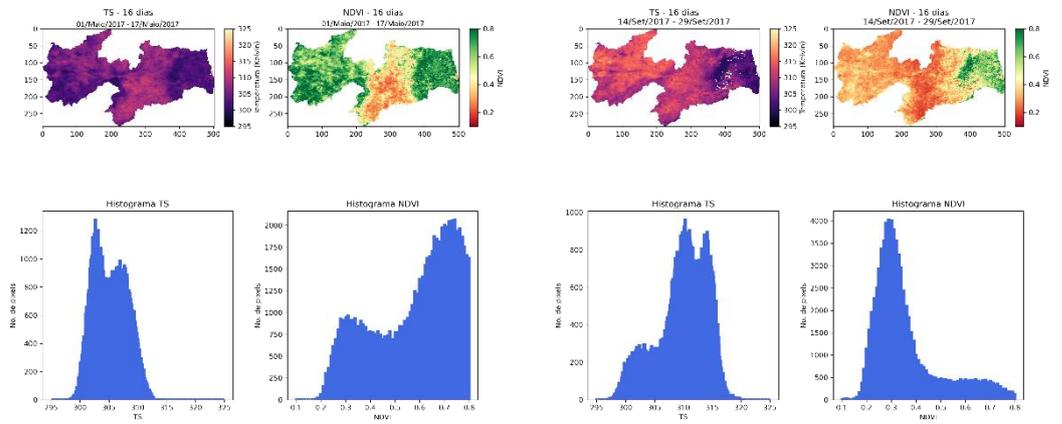
CE/2017

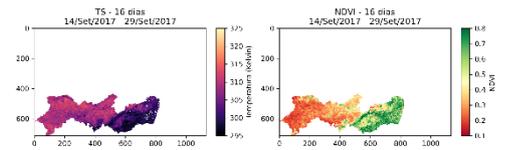
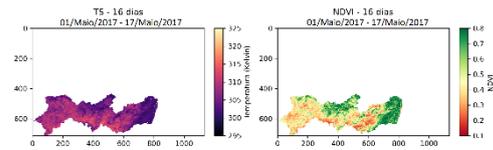


MA/2017

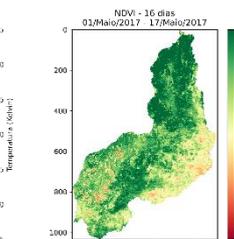
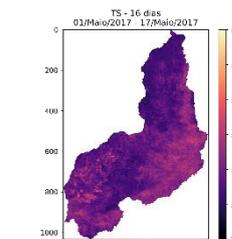
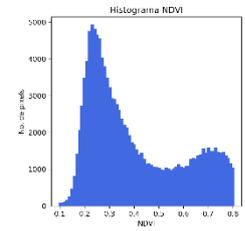
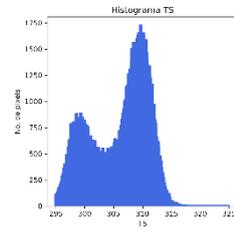
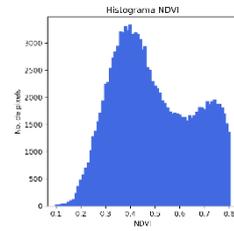
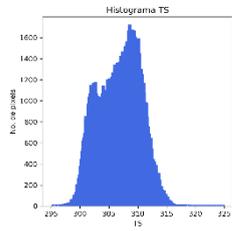


PB/2017

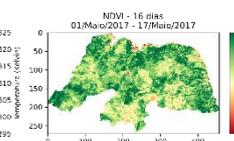
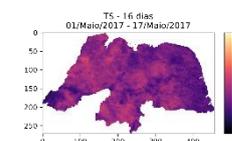
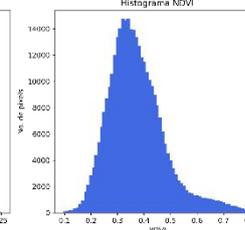
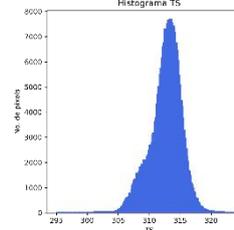
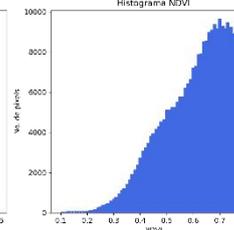
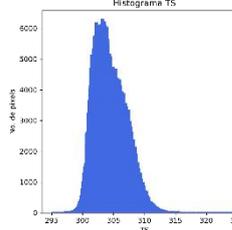




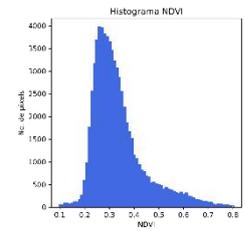
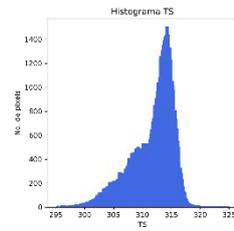
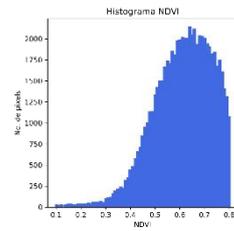
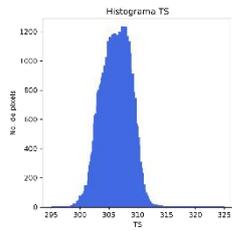
PE/2017



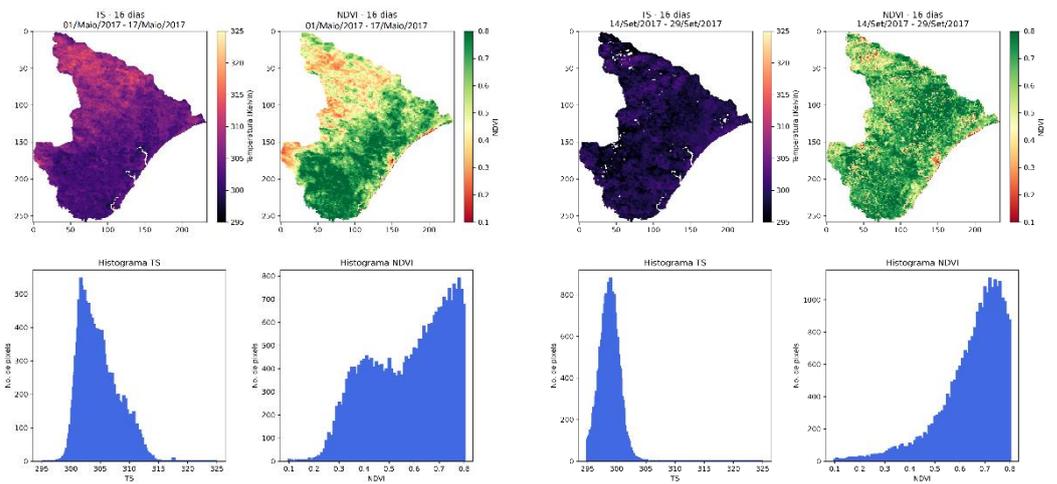
PI/2017



RN/2017



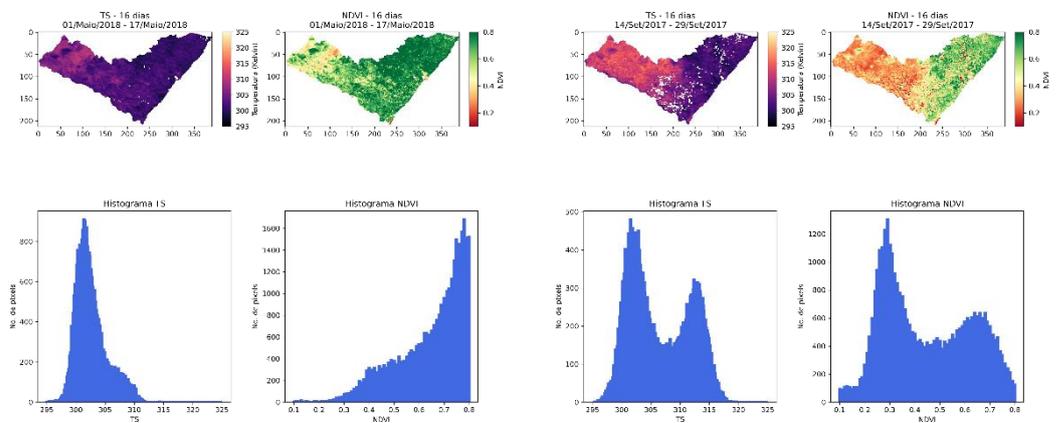
SE/2017



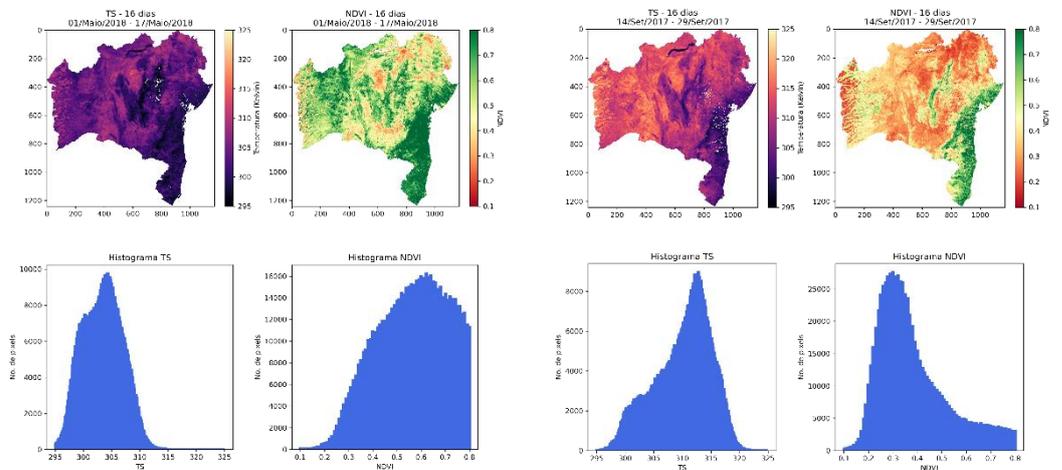
MAIO

SETEMBRO

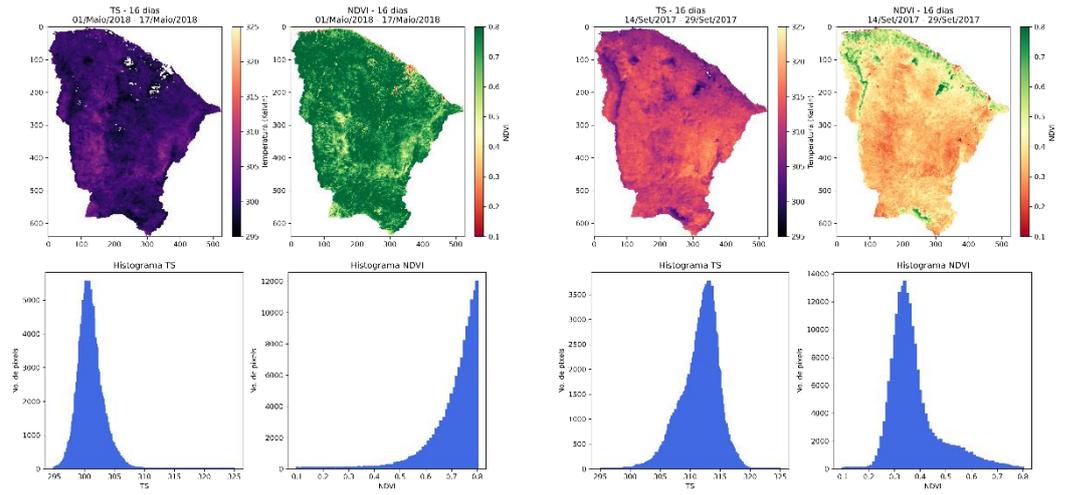
AL/2018



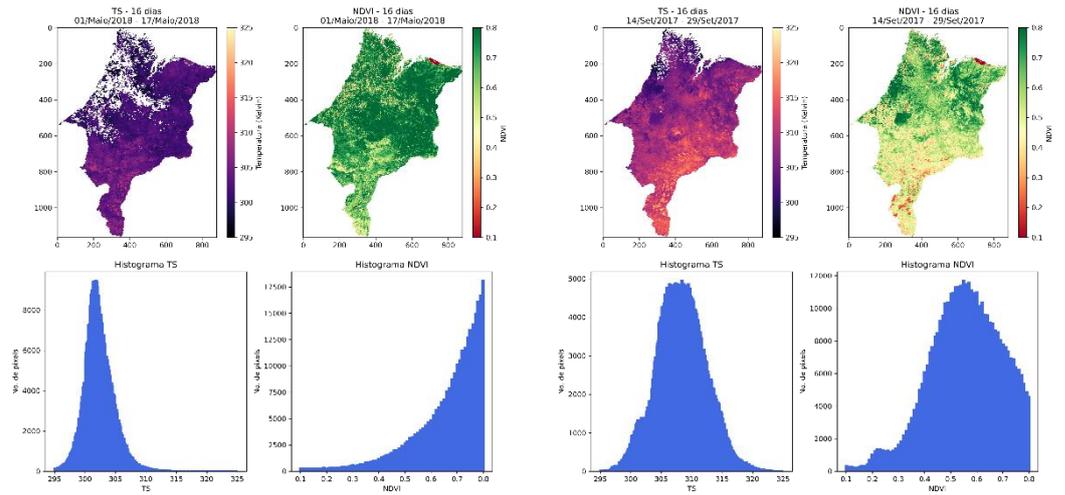
BA/2018



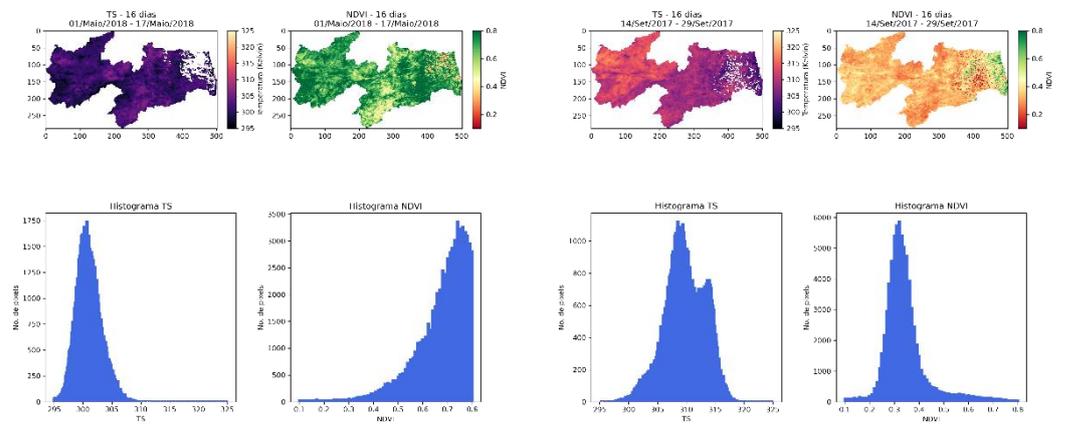
CE/2018

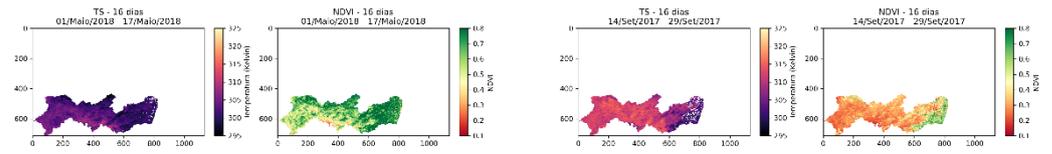


MA/2018

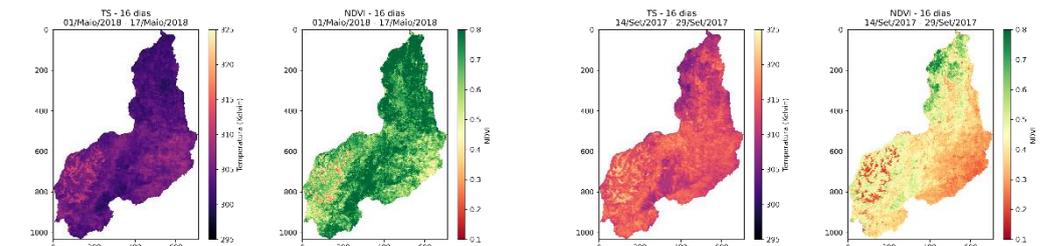
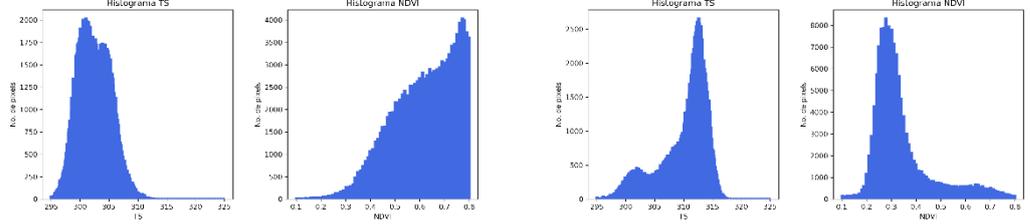


PB/2018

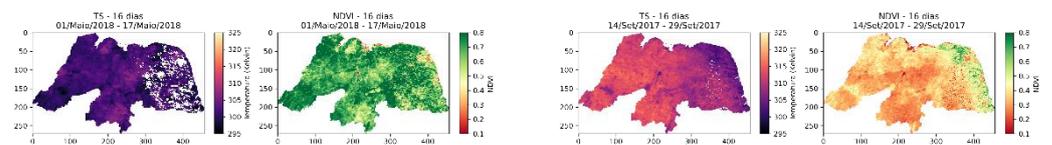
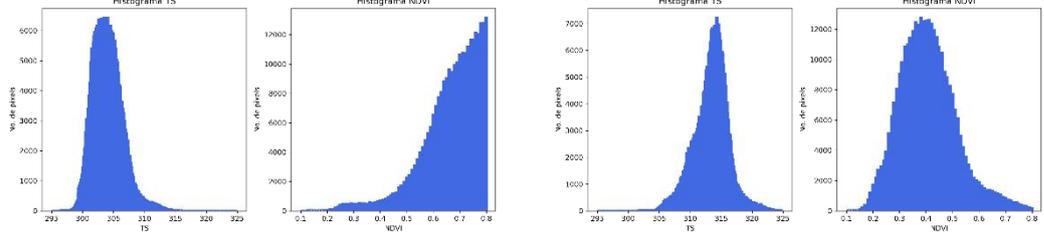




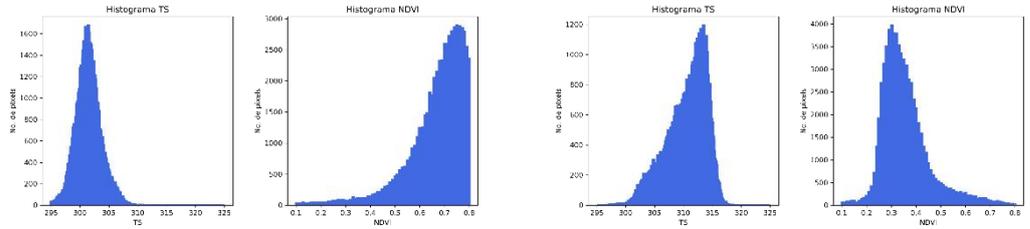
PE/2018



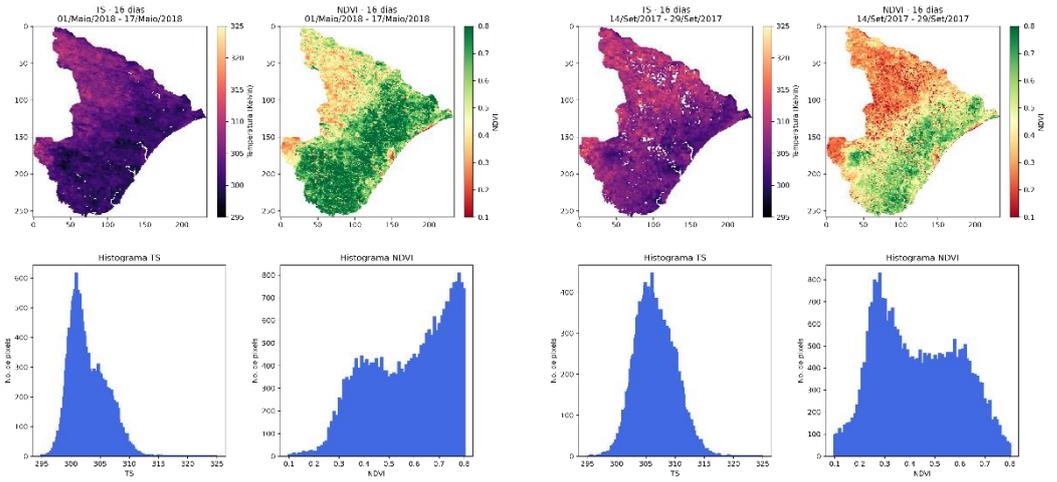
PI/2018



RN/2018



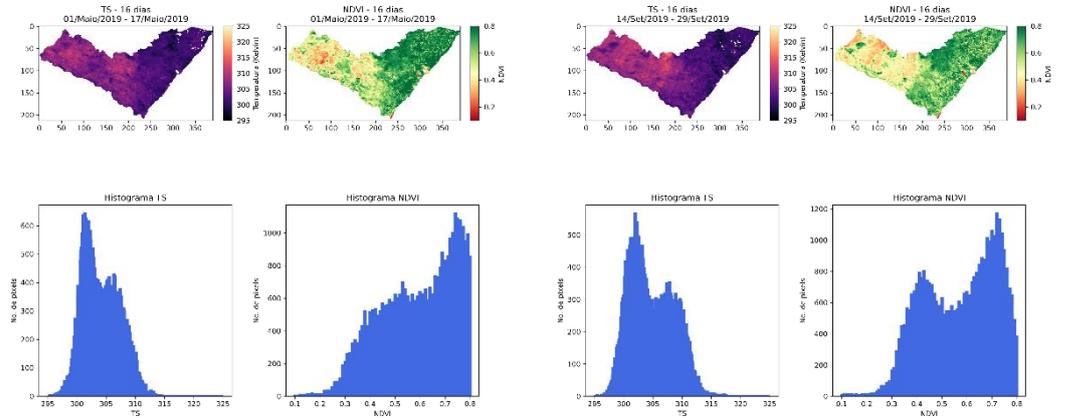
SE/2018



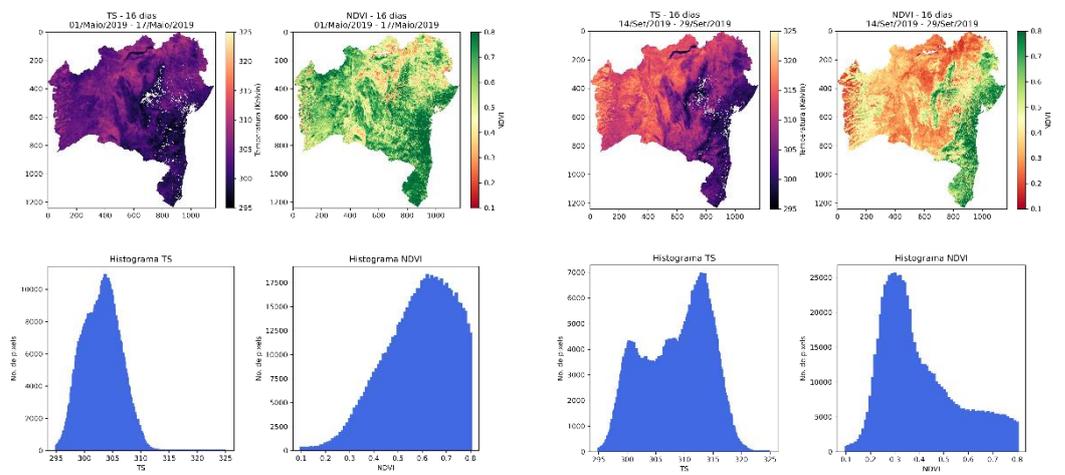
MAIO

SETEMBRO

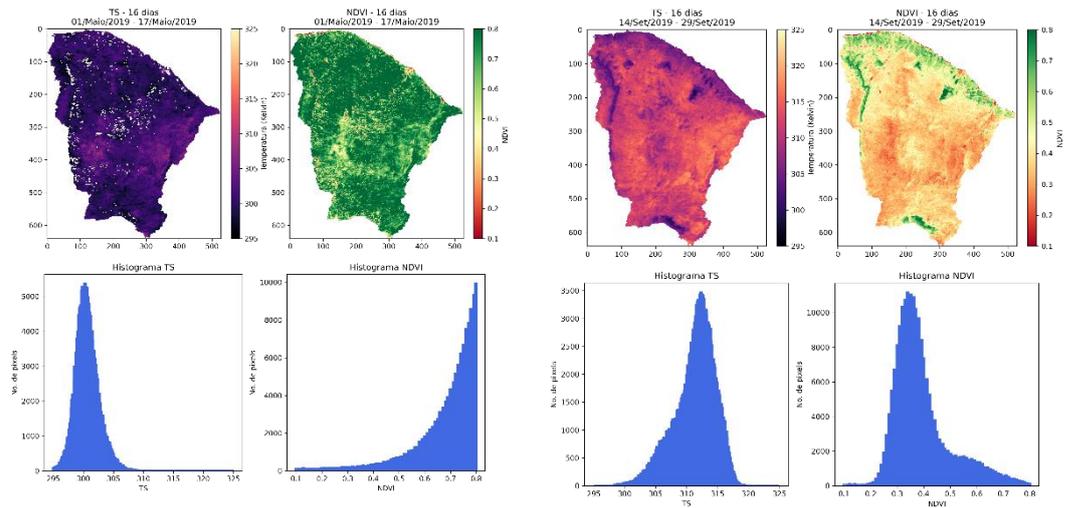
AL/2019



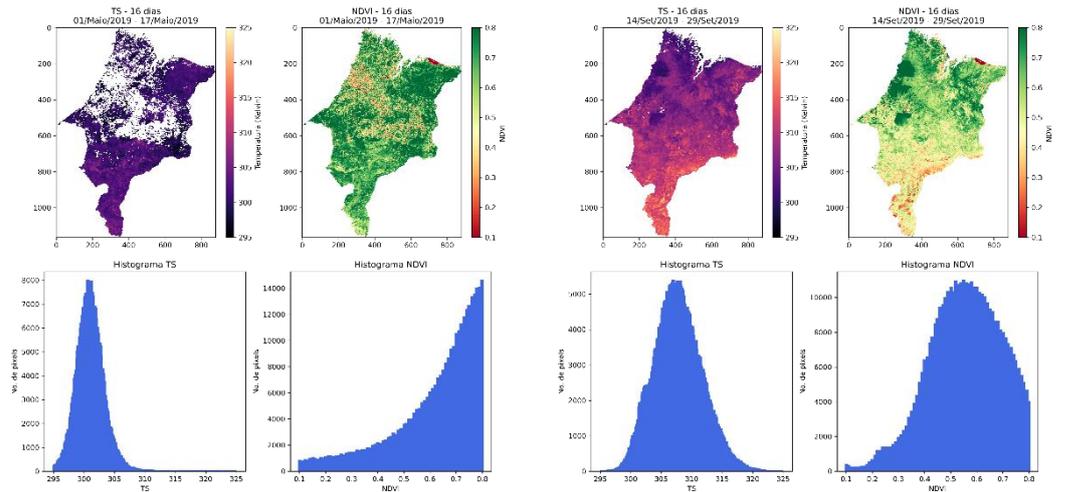
BA/2019



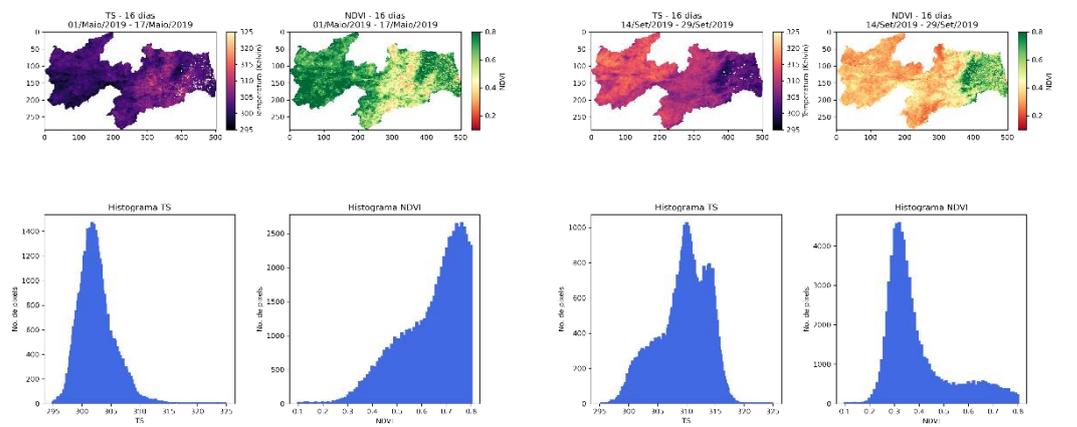
CE/2019

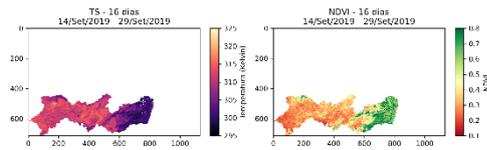
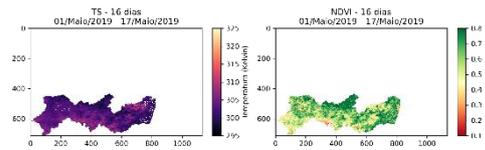


MA/2019

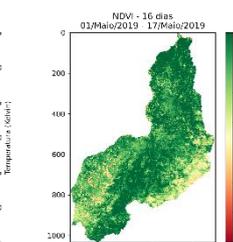
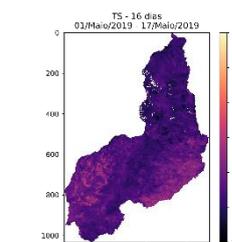
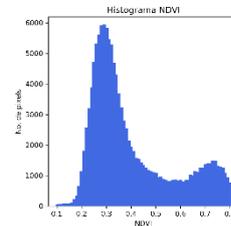
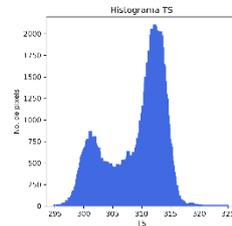
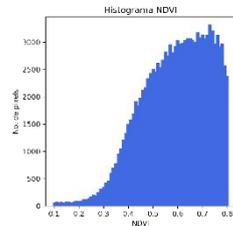
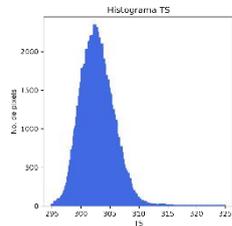


PB/2019

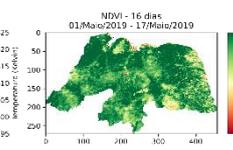
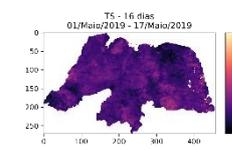
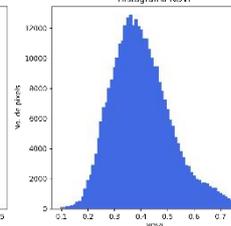
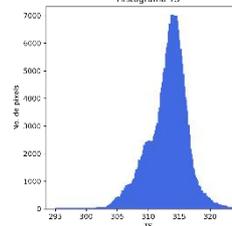
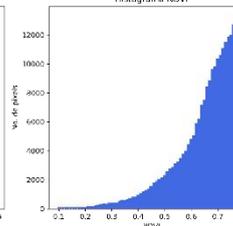
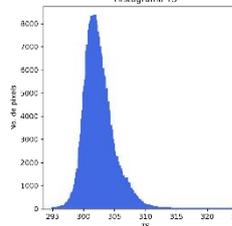




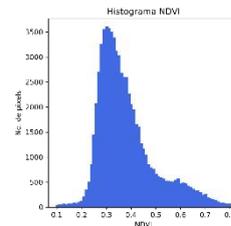
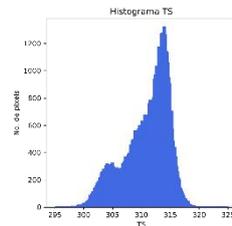
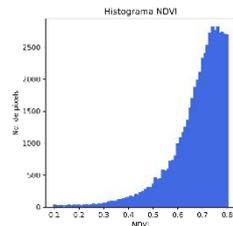
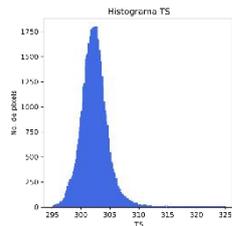
PE/2019



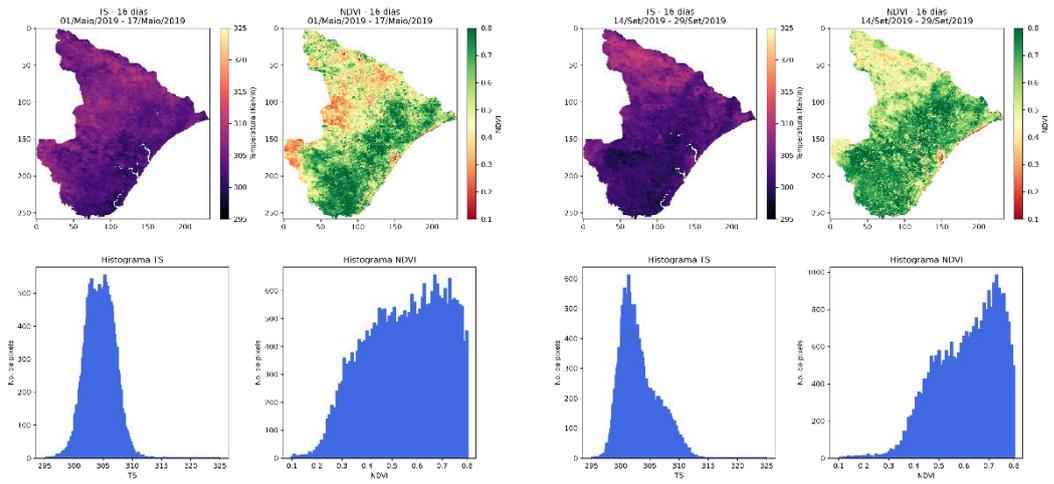
PI/2019



RN/2019



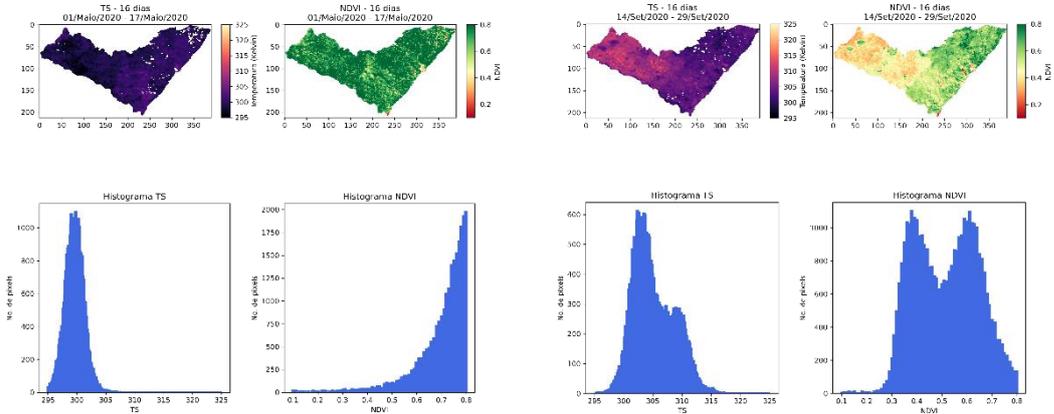
SE/2019



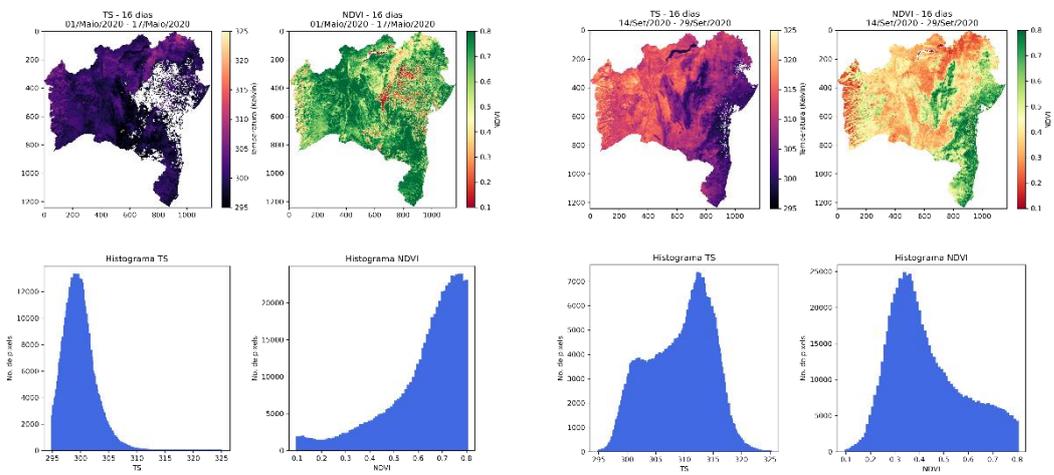
MAIO

SETEMBRO

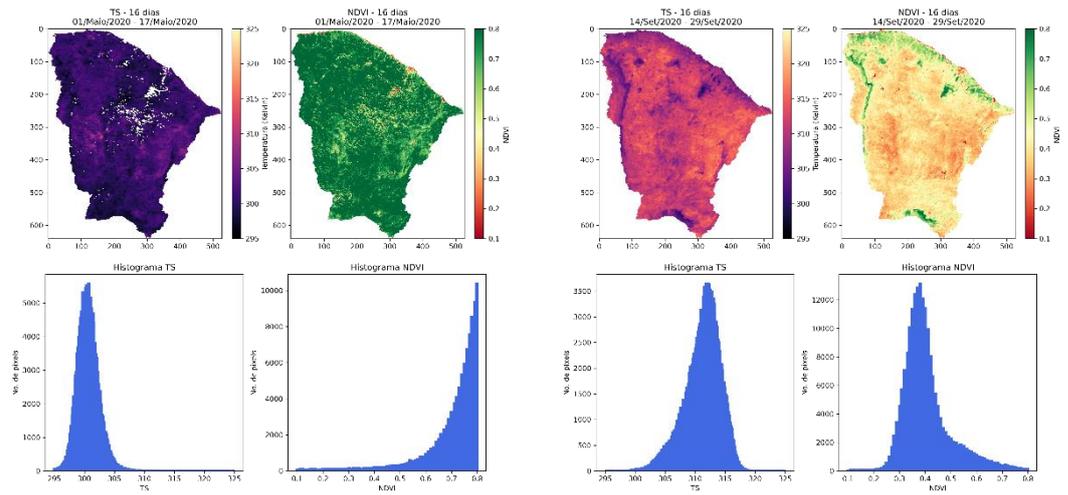
AL/2020



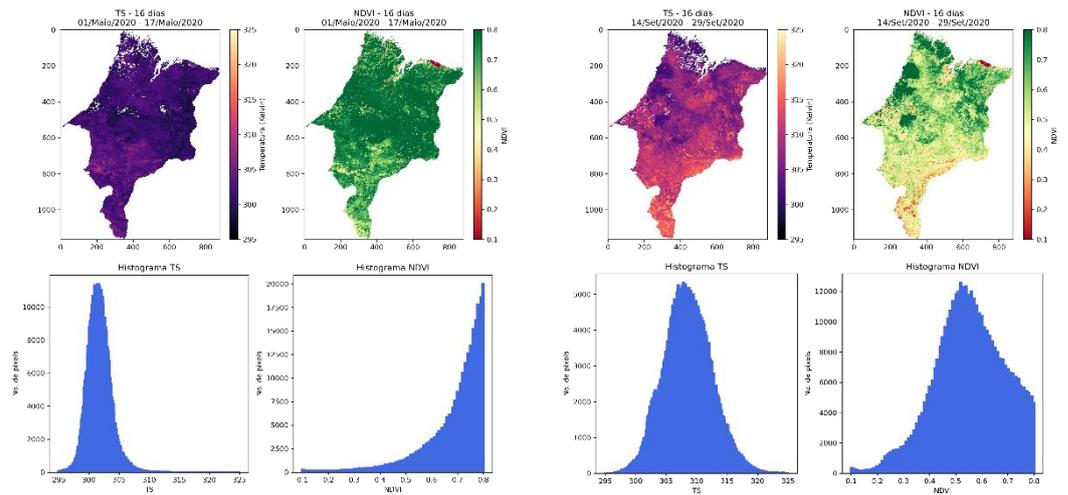
BA/2020



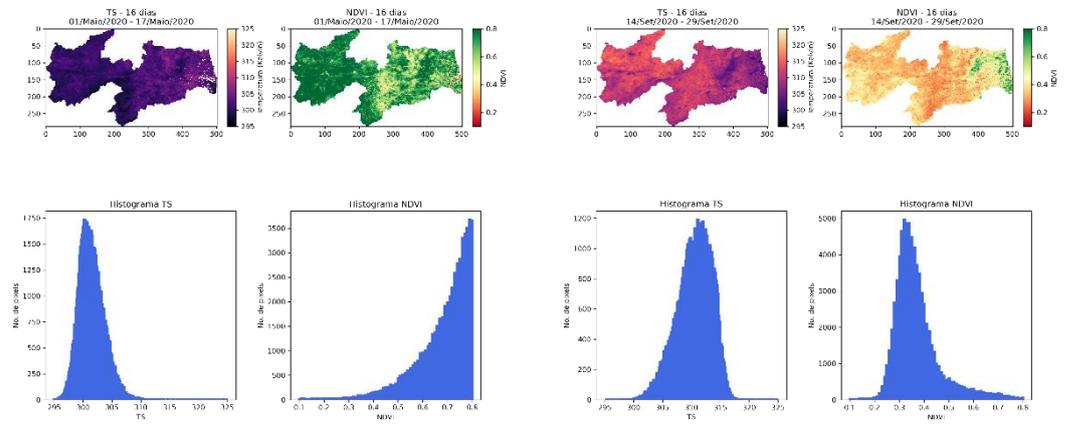
CE/2020



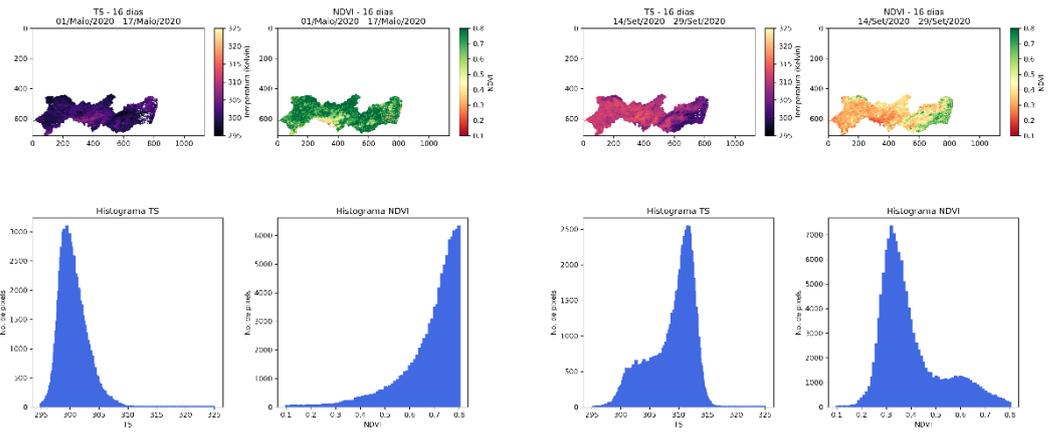
MA/2020



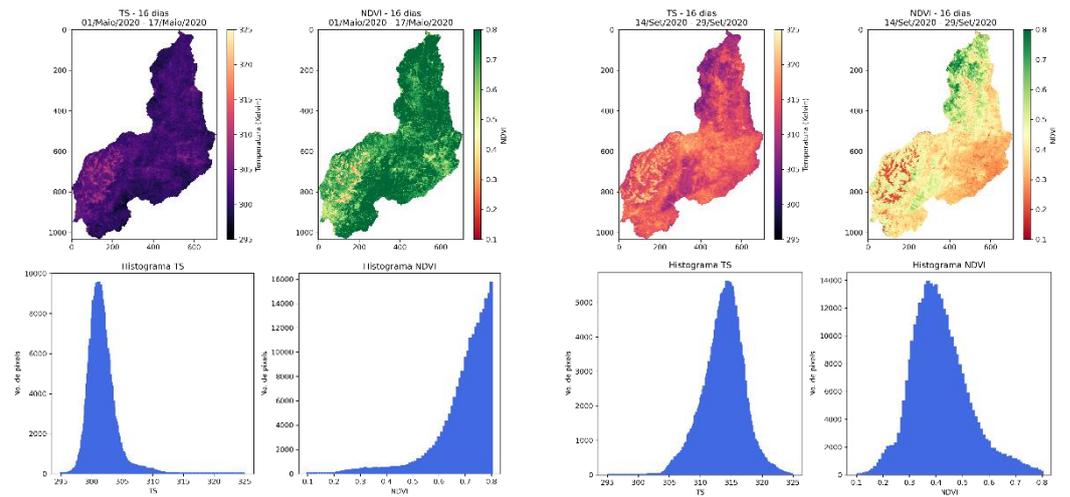
PB/2020



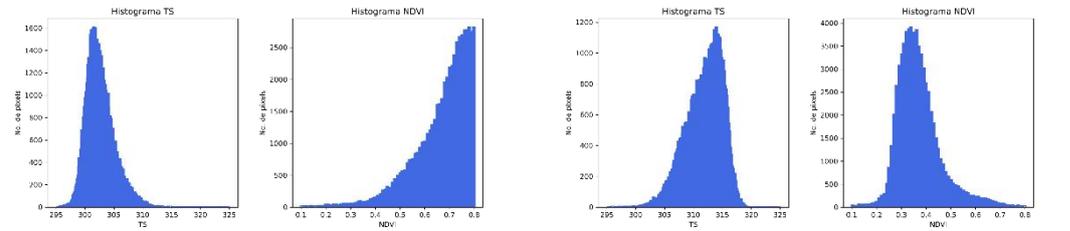
PE/2020



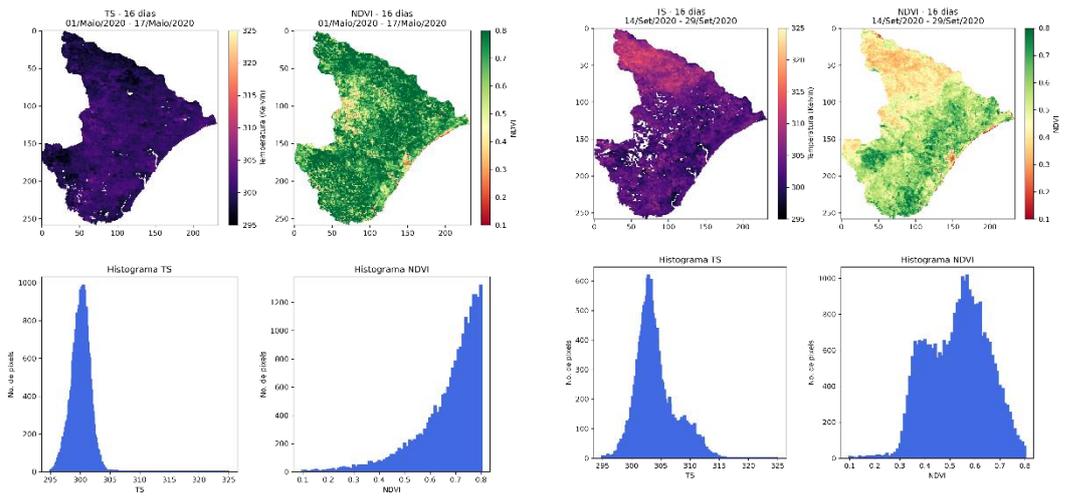
PI/2020



RN/2020



SE/2020



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **O MONITOR DE SECAS**. [S.l.]. 2019. Disponível em: <<http://monitordesecas.ana.gov.br/o-monitor-de-secas>>. Acesso em 31 dez. 2020

ALVARES C.A., STAPE J.L., SENTELHAS P.C., DE MORAES GONCALVES J.L., SPAROVEK G., 2013 : Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Vol. 22, No. 6, 711–728. DOI 10.1127/0941-2948/2013/0507.

BEGUERÍA, S.; VICENTE-SERRANO, S. M.; ANGULO-MARTÍNEZ, M. A multiscalar global drought dataset: the SPEIbase: a new gridded product for the analysis of drought variability and impacts. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 10, p. 1351-1356, 2010. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/bams/article-pdf/91/10/1351/3737355/2010bams2988_1.pdf>. Acesso em: 08 set. 2020.

BEZERRA, D. X.; NAGEL, G. W.; TEIXEIRA, R. C. S.; COELHO, S. C. C. An assessment of water stress conditions in Ceará state based on TVDI using MODIS data. **GEOINFO, 20 Years After!**, p. 224, 2019. Disponível em: <http://mtc-m21c.sid.inpe.br/attachment.cgi/sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/12.10.14.01/doc/proceedings_2019_compressed.pdf#page=237>. Acesso em 02 jun. 2020.

CARMO, M. V. N. S.; LIMA, C. H. R. Caracterização Espaço-Temporal das Secas no Nordeste a partir da Análise do índice SPI. **Rev. bras. meteorol.**, v.35, n.2, p.233-242, 2020. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862020000200233&lng=es&nrm=iso>. Acesso em 26 out. 2020.

CAO, X.; FENG, Y.; WANG, J. Remote sensing monitoring the spatio-temporal changes of aridification in the Mongolian Plateau based on the general Ts-NDVI space, 1981–2012. **Journal of Earth System Science**, v. 126, n. 4. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12040-017-0835-x?shared-article-renderer>>. Acesso em 01 abr. 2021.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS) DO INPE (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **MONITORAMENTO GLOBAL**. São José dos Campos. 2015. Disponível em: <<http://clima1.cptec.inpe.br/monitoramentoglobal/pt>>. Acesso em 15 fev. 2021.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS. **MONITORAMENTO DE SECAS E IMPACTOS NO BRASIL – JANEIRO/2021**. São José dos Campos. 2021. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/monitoramento-de-secas-e-impactos-no-brasil-janeiro2021/>>. Acesso em 30 jan. 2021.

CUNHA, A. P. M. A.; ZERI, M.; LEAL, K. D.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; CUNNINGHAM, C.; GARCIA, J.V. C.; BROEDEL, E.; ALVALÁ, R.; RIBEIRO-NETO, G.

Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, Basel, v. 10, n. 11, p. 642, 2019.

DIDAN, K; MUNOZ, A. B; SOLANO, R.; HUETE, A. **MODIS vegetation index user's guide (MOD13 Series)**. University of Arizona, 2015. Disponível em: <<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a2v006/#documentation>>. Acesso em: 27 out. 2020.

DU, L. *et al.* A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 23, p. 245-253, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0303243412002048?via%3Dihub>>. Acesso em 08 set. 2020.

DURIGAN, G.; PILON, N. A. L.; ASSIS, G. B.; SOUZA, F. M.; BATELLO, J. B. **Plantas pequenas do cerrado: biodiversidade negligenciada**. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Florestal, 2018.

EUROPEAN SPACE AGENCY. **SMOS Mission**. Disponível em: <<https://earth.esa.int/eogateway/missions/smos>>. Acesso em 12 dez. 2020.

FERNANDES, D. S; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L.; AMORIM, A. O; CARDOSO, A. S. Índices para a quantificação da seca. **Embrapa Arroz e Feijão-Documentos (INFOTECA-E)**, 2009. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/663874/1/doc244.pdf>>. Acesso em 08 set. 2020.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais Sistemas Atmosféricos Atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a Influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no Clima da Região. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 1, n. 1, p. 15-26, dec. 2005. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/25215/16909>>. Acesso em 08 set. 2020.

FREITAS, M.A.S. O Fenômeno das Secas no Nordeste do Brasil: Uma Abordagem Conceitual. **Anais do IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Bahia, 2008. Disponível em: <<http://www.academia.edu/download/58777413/O-Fenomeno-das-Secas-no-Nordeste-do-Brasil.pdf>>. Acesso em: 08 set. 2020.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **MAPA MAIS RECENTE: Setembro/2014**. [S.l.]. 2014. Disponível em: <<http://monitordesecas.ana.gov.br/mapa?mes=9&ano=2014>>. Acesso em 20 fev. 2021.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **MAPA MAIS RECENTE: Maio/2016**. [S.l.]. 2014. Disponível em: <<http://monitordesecas.ana.gov.br/mapa?mes=5&ano=2016>>. Acesso em 20 fev. 2021.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **MAPA MAIS RECENTE: Setembro/2016**. [S.l.]. 2014. Disponível em: <<http://monitordesecas.ana.gov.br/mapa?mes=9&ano=2016>>. Acesso em 20 fev. 2021

HOLZMAN, M. E.; RIVAS, R.; PICCOLO, M. C. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 28, 181–192, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243413001748>>. Acesso em 09 jan. 2021.

HUANG, Y.; TIAN, Q.; DU, L.; SUN, S. Analysis of Spatial-Temporal Variation of Agricultural Drought and Its Response to ENSO over the Past 30 Years in the Huang-Huai-Hai Region, China. **Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences**, v. 24, n. 4, 2013.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, n. 83, p. 195-213, 2002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425702000962>>. Acesso em: 26 out. 2020.

IBGE. **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil**: compatível com a escala 1:250 000. Rio de Janeiro: IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2019. 164 p., v. 45. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo.html?id=2101676&view=detalhes>>. Acesso em 14 jan. 2021.

JUN, B.; YUAN, Y. U.; DI, L. Comparison between TVDI and CWSI for drought monitoring in the Guanzhong Plain, China. **Journal of integrative agriculture**, v. 16, n. 2, p. 389-397, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095311915613028>>. Acesso em 15 jan. 2021.

KANE, R. P. Prediction of droughts in north-east Brazil: Role of ENSO and use of periodicities. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 17, n. 6, p. 655-665, 1997. Disponível em: <[https://rsmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199705\)17:6%3C655::AID-JOC144%3E3.0.CO;2-1](https://rsmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/(SICI)1097-0088(199705)17:6%3C655::AID-JOC144%3E3.0.CO;2-1)>. Acesso em 06 out. 2020.

KERR, Y.H.; WALDTEUFEL, P.; WIGNERON, J.P.; DELWART, S.; CABOT, F.; BOUTIN, J.; ESCORIHUELA, M.J.; FONT, J.; REUL, N.; GRUHIER, C.; JUGLEA, S.E. “The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle”. **Proceedings of the IEEE**, v. 98, n. 5, p. 666-687, 2010. Disponível em: <<https://hal.ird.fr/ird-00494925/document>>. Acesso em 15 dez 2020.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, 107(9), 1140-1153, 1979. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/107/9/1520-0493_1979_107_1140_fionb_2_0_co_2.xml?tab_body=pdf>. Acesso em 10 jan 2021.

LIANG, L.; ZHAO, S.; HE, K.; CHEN, C.; LUO, Y.; ZHAO, X. Drought change trend using MODIS TVDI and its relationship with climate factors in China from 2001 to 2010. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 13, n. 7, p. 1501-1508, 2014.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to times scale. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 1993, Boston.

Anais... Boston: [s.n.], 1993. p. 179–184. Disponível em: <<https://climate.colostate.edu/pdfs/relationshipofdroughtfrequency.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2020.

MARENGO, J.A.; ALVES, L.M.; SOARES, W.R.; RODRIGUEZ, D.A. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: Flood in Amazonia and drought in Northeast Brazil. **J. Clim.**, 2013, v. 26, p. 9137–9154.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALÁ, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 2017. Disponível em: <<https://doi:10.1590/0001-376520170206>>. Acesso em: 09 set. 2020.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Climanálise**, v. 3, p. 49-54, 2016. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/30anos/marengoetal.pdf>>. Acesso em 27 out. 2020.

MARTINS, E. S. P. R. *et al.* **Monitor de Secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas**. The World Bank, 2015. Disponível em: <<http://documents.worldbank.org/curated/en/2016/06/26458807/search-new-paradigm-drought-management-northeast-drought-monitor-monitor-de-secas-nordeste-em-busca-de-um-novo-paradigma-para-gest%C3%A3o-de-secas>>. Acesso em: 22 set. 2020.

MELO, E. T.; SALES, M. C. L.; OLIVEIRA, J. G. B. Aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para análise da degradação ambiental da microbacia hidrográfica do Riacho dos Cavalos, Crateús-CE. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 23, 2011.

MENG, L. *et al.* The calculation of TVDI based on the composite time of pixel and drought analysis. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 38, n. Part II, 2010.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **Lista de indicadores | Sobre o AdaptaBrasil**. [S.l.]. 2021. Disponível em: <https://adaptabrasil.mcti.gov.br/sobre/lista-de-indicadores>. Acesso em 30 jan. 2021

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **MODIS web**. Disponível em: <<https://modis.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 27 out. 2020.

NOBRE, P. As origens das águas no Nordeste. *In*: **AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS**. A questão da água no nordeste. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <<https://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2012/aQuestaoDaAguaNoNordeste.pdf>>. Acesso em 10 jan 2021.

OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, A. J. B.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C. S.; CORREIA, M. F.; MOURA, M. S. B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, p. 378-386, 2006. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/159429>>. Acesso em: 11 jan. 2021.

PAJARÓN, M. A. C. **ESTIMACIÓN DEL TVDI (TEMPERATURE VEGETATION DRYNESS INDEX) Y SU RELACIÓN CON LA HUMEDAD DEL SUELO EN LA ZONA DE VALIDACIÓN DE SMOS DE LA VALENCIA ANCHOR STATION.** 105 f. Dissertação (Master en Teledetección) – Universidade de Valencia, Espanha, 2010.

PEREIRA, M. S. **Manual técnico: conhecendo e produzindo sementes e mudas da caatinga.** Fortaleza: Associação Caatinga, 2011.

RAHMOUNE, R.; PICCHIANI, M. **Lesson 10: Monitoring Soil Moisture.** Italy, 2013. Disponível em: <<https://www.learn-eo.org/lessons/110/#in>>. Acesso em 07 abr. 2021.

SANDHOLT, I; RASMUSSEN, K; ANDERSEN, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. **Remote Sensing of Environment**, v. 79, p. 213-224, 2002.

SMOS-BEC TEAM. **New release of 1-km SMOS soil moisture over European and Mediterranean countries.** Barcelona, 2020. Disponível em: <<http://bec.icm.csic.es/new-release-of-1-km-smos-soil-moisture-over-european-and-mediterranean-countries/>>. Acesso em 15 dez. 2020.

UVO, C.; BERNDTSSON, R. Regionalization and spatial properties of Ceará State rainfall in northeast Brazil. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 101, n. D2, p. 4221-4233, 1996. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/95JD03235>>. Acesso em: 08 set. 2020.

UVO, C. R. B. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro.** 92 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1989. Disponível em: <<http://marte3.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1905/2005/07.26.22.54/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em 05 jan 2021.

WANG, C.; QI, S.; NIU, Z.; WANG, J. Evaluating soil moisture status in China using the temperature–vegetation dryness index (TVDI). **Can. J. Remote Sensing**, v. 30, n. 5, p. 671–679, 2004. Disponível em: <https://www-tandfonline.ez11.periodicos.capes.gov.br/doi/abs/10.5589/m04-029>>. Acesso em: 26 out 2020.

WAN, Z. **MODIS Land Surface Temperature Products Users' Guide.** University of California, 2015. Disponível em: <<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a2v006/#documentation>>. Acesso em 27 out. 2020.