



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FABIANNY JOANNY BEZERRA CABRAL DA SILVA

**USO DE ÍNDICES FÍSICOS E DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA
QUANTIFICAÇÃO DA SECA E ARIDEZ E DETERMINAÇÃO DA
SUSCEPTIBILIDADE À DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO**

Recife
2020

FABIANNY JOANNY BEZERRA CABRAL DA SILVA

**USO DE ÍNDICES FÍSICOS E DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA
QUANTIFICAÇÃO DA SECA E ARIDEZ E DETERMINAÇÃO DA
SUSCEPTIBILIDADE À DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo

Recife
2020

Catálogo na fonte

Biblioteca Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586u Silva, Fabianny Joanny Bezerra Cabral da.
Uso de índices físicos e de sensoriamento remoto para
quantificação da seca e aridez e determinação da susceptibilidade à
desertificação no semiárido pernambucano / Fabianny Joanny
Bezerra Cabral da Silva. - 2020.
226 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.
Inclui Referências, Glossário e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Bacia do rio Brígida. 3. RAI. 4. SPI.
5. Palmer. 6. Martonne. 7. Índice de vegetação. I. Azevedo, José
Roberto Gonçalves de (Orientador). II. Título

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2020-129



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Tese de Doutorado

**USO DE ÍNDICES FÍSICOS E DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA
QUANTIFICAÇÃO DA SECA E ARIDEZ E DETERMINAÇÃO DA
SUSCEPTIBILIDADE À DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO**

defendida por

FABIANNY JOANNY BEZERRA CABRAL DA SILVA

Considera a candidata APROVADA

Recife, 06 de fevereiro de 2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^a Dr.^a Rosângela Sampaio Reis (Examinadora externa)
Universidade Federal de Alagoas

Prof.^a Dr.^a Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Examinadora externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Aos meus avós

Luzinete das Chagas Bezerra

Luzia Cabral da Silva

José Cabral da Silva

In Memoriam

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus primeiramente, por toda a força, resiliência, paz e fé para direcionar as minhas ações, e sempre me estimular a não desistir, pois depois de uma tempestade sempre vem a calmaria, e sem esforço não a vitória.

Ao meu pai Ernande, a minha mãe Lourdes e a minha irmã Suzy por sempre dar incentivo para alcançar novos desafios e crescer profissionalmente e pessoalmente, respeitando a todos com ética e amor ao próximo.

Ao meu orientador Prof. Roberto Azevedo que contribuiu imensamente com conteúdo técnico, ajuda no desenvolvimento do trabalho, apoio e torcida para finalização do doutorado, e por entender o quanto é difícil conciliar a vida profissional com a acadêmica.

Aos colegas de turma do curso de pós-graduação, como Ana Lígia, Claudinha, Gabriela e Jussara, que tornaram os momentos das disciplinas um pouco descontraídos e prazerosos.

A Profa. Leijdane Oliveira, do departamento de pós-graduação, de Engenharia Cartográfica da UFPE pelos conselhos durante as etapas das atividades de processamento dos dados.

A José Carlos Borba por auxiliar com os estudos de solos da bacia, essencial para a realização de algumas etapas da tese.

A alguns profissionais da instituição como Andrea Negromonte, da secretaria da pós-graduação, de Engenharia Civil por sempre auxiliar nos processos administrativos no decorrer do curso.

A todas aquelas pessoas que de alguma forma contribuíram para a finalização dessa etapa e enriquecimento profissional.

Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho.
Dalai Lama

RESUMO

Em regiões semiáridas, a utilização de índices de seca, aridez e de vegetação a fim de estabelecer diagnósticos e prognósticos que ajudem na gestão dos recursos hídricos é crucial, sobretudo, para a avaliação de disponibilidade hídrica em longo prazo, e monitoramento de eventos hidrológicos extremos. Assim, no presente estudo foram empregados índices de Seca (RAI, SPI e PDSI), de Aridez (MIA, AI e AI_{ASD}), e de vegetação (NDVI, EVI, SAVI, SVI e VCI) para avaliar as tendências desses eventos na bacia do rio Brígida em Pernambuco. Os resultados desses índices foram submetidos ao Teste Estatístico de Tukey e a avaliação da tendência climática por meio de aplicativo específico (TREND). O Teste de Tukey indicou que o método PDSI e RAI são os mais indicados para a análise de seca; enquanto que o AI é mais apropriado para a aridez; e o VCI é o mais adequado para avaliação da condição da vegetação, apesar de visualmente, os métodos NDVI, EVI e SAVI representarem a condição real observada. Os resultados indicaram que independente dos índices empregados (seca, aridez e vegetação), os postos apresentaram resultados significativos na análise de tendência, sugerindo intensificação desses eventos ao longo do tempo. A correlação espacial indicou relações altas e moderadas para os índices de aridez (MIA, AI e AI_{ASD}) x índices de vegetação, e esse comportamento se repetiu nas correlações pontuais ao longo do período das imagens analisadas (1986-2011). As correlações espaciais e pontuais indicaram que o uso de índices de vegetação obtidos por meio de sensoriamento remoto pode ser empregado como método alternativo aos índices físicos, de seca e de aridez, como ferramenta para o monitoramento de eventos extremos, assim como, indicação de áreas susceptíveis ao processo de desertificação. Além disso, podem auxiliar na gestão dos recursos hídricos pelos órgãos gestores, indicando a evolução dos fenômenos hidrológicos extremos, sugerindo a adoção de ações preventivas e mitigadoras quanto ao uso prioritário da água.

Palavras-chave: Bacia do rio Brígida. RAI. SPI. Palmer. Martonne. Índice de vegetação.

ABSTRACT

In semiarid regions, the use of drought, aridity and vegetation indices in order to establish diagnoses and prognoses that help manage water resources is crucial, above all, for the assessment of long-term water availability, and monitoring of extreme hydrological events. Thus, in the present study, drought (RAI, SPI and PDSI), aridity (MIA, AI and AI_{ASD}), and vegetation (NDVI, EVI, SAVI, SVI and VCI) indices were used to evaluate the trends of these events in the Brígida river basin in Pernambuco. The results of these indices were submitted to the Tukey Statistical Test and the evaluation of the climate trend through a specific application (TREND). The Tukey Test indicated that the PDSI and RAI method are the most indicated for drought analysis; whereas AI is more appropriate for aridity; and the VCI is the most suitable for evaluating the vegetation condition, although visually, the NDVI, EVI and SAVI methods represent the actual condition observed. The results indicated that regardless of the indexes used (drought, aridity and vegetation), the stations presented significant results in trend analysis, suggesting intensification of these events over time. Spatial correlation indicated high and moderate relationships for aridity indexes (MIA, AI and AI_{ASD}) x vegetation indexes, and this behaviour was repeated in the punctual correlations during the period of the analysed images (1986-2011). Spatial and punctual correlations indicated that the use of vegetation indexes obtained through remote sensing could be used as an alternative method to physical, dry and aridity indices, as a tool for monitoring extreme events, as well as indication of areas susceptible to the desertification process. In addition, they can help manage water resources by the managing bodies, indicating the evolution of extreme hydrological phenomena, suggesting the adoption of preventive and mitigating actions regarding the priority use of water.

Keywords: Brígida river basin. RAI. SPI. Palmer. Martonne. Vegetation Indice.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da bacia do rio Brígida.....	43
Figura 2 – Hidrografia na bacia do rio Brígida.	44
Figura 3 – Geologia na bacia do rio Brígida.	49
Figura 4 – Domínios hidrogeológicos na bacia do rio Brígida.	51
Figura 5 – Geomorfologia na bacia do rio Brígida.	53
Figura 6 – Hipsometria na bacia do rio Brígida.	54
Figura 7 – Classes de solos na bacia do rio Brígida.	55
Figura 8 – Cobertura vegetal e Unidades de Conservação (UCs) na bacia do rio Brígida.	59
Figura 9 – Sequência do procedimento de consistência dos dados pluviométricos. .	66
Figura 10 – Curva de Dupla Massa dos 60 postos da bacia do rio Brígida.	99
Figura 11 – Polígono de Thiessen dos 38 postos pluviométricos na bacia do rio Brígida.	100
Figura 12 – Análise da série pluviométrica do posto 839012 no aplicativo TREND.	103
Figura 13 – Análise da série pluviométrica do posto 840003 no aplicativo TREND.	104
Figura 14 – Análise da série pluviométrica do posto 840015 no aplicativo TREND.	104
Figura 15 – Classes de NDVI no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida. ...	128
Figura 16 – Média histórica (1986-2011) do valor de NDVI na bacia do rio Brígida.	129
Figura 17 – Classes de EVI no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.	132
Figura 18 – Média histórica (1986-2011) do valor de EVI na bacia do rio Brígida...	133
Figura 19 – Classes de SAVI no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.....	136
Figura 20 – Média histórica (1986-2011) do valor de SAVI na bacia do rio Brígida.	137
Figura 21 – Classes de SVI no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.	140
Figura 22 – Média histórica (1986-2011) do valor de SVI na bacia do rio Brígida...	141
Figura 23 – Classes de VCI no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.....	143
Figura 24 – Média histórica (1986-2011) do valor de VCI na bacia do rio Brígida. .	144

Figura 25 – Média histórica (1986-2011) do coeficiente de determinação (R^2) dos
índices de Seca e Aridez x Índices de Vegetação.....162

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Municípios localizados na bacia do rio Brígida – PE.	42
Tabela 2 – Principais corpos de acumulação da bacia do rio Brígida e seus respectivos volumes atuais.	45
Tabela 3 – Resultados do monitoramento de qualidade das águas dos reservatórios da bacia do rio Brígida.	46
Tabela 4 – Variáveis meteorológicas da Estação 82886 de Cabrobó, segundo as Normais Climatológicas de 1961-1990.....	48
Tabela 5 – Capacidade de campo do solo (CC) obtida para a bacia do rio Brígida.	58
Tabela 6 – Registros de desastres naturais nos municípios que integram a bacia do rio Brígida no período de 1991-2019.....	61
Tabela 7 – Estações convencionais localizadas na bacia do rio Brígida - PE.....	71
Tabela 8 – Categorias do Índice de Anomalia de Chuva (RAI).	73
Tabela 9 – Categorias do Índice de Precipitação Padronizado (SPI).....	76
Tabela 10 – Categorias do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI).	78
Tabela 11 – Categorias do Índice de Aridez de Martonne (MIA).....	79
Tabela 12 – Categorias do Índice de Aridez de Thornthwaite (AI).	80
Tabela 13 – Classificação do <i>AIASD</i> proposto pela UNESCO (1979) e adaptado pela Resolução CONAMA.....	81
Tabela 14 – Data das imagens empregada na avaliação dos índices de vegetação.	82
Tabela 15 – Especificações das bandas do satélite Landsat-5.....	82
Tabela 16 – Principais características e aplicações do satélite Landsat-5.....	83
Tabela 17 – Valores de radiância e irradiância espectral do Landsat-5 adotados.	84
Tabela 18 – Classificação do NDVI para a cobertura vegetal.	85
Tabela 19 – Classificação do EVI para a cobertura vegetal.	86
Tabela 20 – Classificação do SAVI para a cobertura vegetal.	87
Tabela 21 – Categorias do Índice de Vegetação Padronizado (SVI).	89
Tabela 22 – Classe de severidade do risco de seca para o VCI.....	90
Tabela 23 – Classificação do coeficiente de correlação de Pearson.	93
Tabela 24 – Classificação do coeficiente de determinação (R^2).....	95
Tabela 25 – Dados dos 60 postos pluviométricos analisados na consistência da série pluviométrica.	96

Tabela 26 – Resultados da análise estatística dos postos pluviométricos no aplicativo TREND.	102
Tabela 27 – Variáveis meteorológicas da Estação 82886 de Cabrobó, segundo as Normais Climatológicas Padronizadas (1961-1990).	105
Tabela 28 – Variáveis meteorológicas da Estação 82886 de Cabrobó, segundo as Normais Climatológicas Provisórias (1991-2016).....	106
Tabela 29 – RAI para as 38 estações pluviométricas da bacia do rio Brígida no período de 1961 a 2016.	108
Tabela 30 – Análise de tendência temporal do RAI no aplicativo TREND no período de 1961 a 1990 e 1991 a 2016 para os 38 postos pluviométricos localizados na bacia do rio Brígida.	109
Tabela 31 – SPI para as 38 estações pluviométricas da bacia do rio Brígida no período de 1961 a 2016.	111
Tabela 32 – Análise de tendência temporal do SPI no aplicativo TREND no período de 1961 a 1990 e 1991 a 2016 para os 38 postos pluviométricos localizados na bacia do rio Brígida.	112
Tabela 33 – PDSI para as 38 estações pluviométricas da bacia do rio Brígida no período de 1961 a 2016.	115
Tabela 34 – Análise de tendência temporal do PDSI no aplicativo TREND no período de 1961 a 1990 e 1991 a 2016 para os 38 postos pluviométricos localizados na bacia do rio Brígida.	116
Tabela 35 – MIA para as 38 estações pluviométricas da bacia do rio Brígida no período de 1961 a 2016.	118
Tabela 36 – Análise de tendência temporal do MIA no aplicativo TREND no período de 1961 a 1990 e 1991 a 2016 para os 38 postos pluviométricos localizados na bacia do rio Brígida.	119
Tabela 37 – AI para as 38 estações pluviométricas da bacia do rio Brígida no período de 1961 a 2016.	121
Tabela 38 – Análise de tendência temporal do AI no aplicativo TREND no período de 1961 a 1990 e 1991 a 2016 para os 38 postos pluviométricos localizados na bacia do rio Brígida.	122
Tabela 39 – AI _{ASD} para as 38 estações pluviométricas da bacia do rio Brígida no período de 1961 a 2016.	124

Tabela 40 – Análise de tendência temporal do AI_{ASD} no aplicativo TREND no período de 1961 a 1990 e 1991 a 2016 para os 38 postos pluviométricos localizados na bacia do rio Brígida.	125
Tabela 41 – Classes de NDVI (%) no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.	127
Tabela 42 – Análise de tendência climática do NDVI no aplicativo TREND no período de 1986 a 2011 na bacia do rio Brígida.	130
Tabela 43 – Classes de EVI (%) no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.	131
Tabela 44 – Análise de tendência climática do EVI no aplicativo TREND no período de 1986 a 2011 na bacia do rio Brígida.	133
Tabela 45 – Classes de SAVI (%) no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.	135
Tabela 46 – Análise de tendência climática do SAVI no aplicativo TREND no período de 1986 a 2011 na bacia do rio Brígida.	137
Tabela 47 – Classes de SVI (%) no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.	139
Tabela 48 – Análise de tendência climática do SVI no aplicativo TREND no período de 1986 a 2011 na bacia do rio Brígida.	141
Tabela 49 – Classes de VCI (%) no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.	142
Tabela 50 – Análise de tendência climática do VCI no aplicativo TREND no período de 1986 a 2011 na bacia do rio Brígida.	144
Tabela 51 – Análise estatística do Teste de Tukey para as médias dos índices de seca.	147
Tabela 52 – Análise estatística do Teste de Tukey para as médias dos índices de aridez.	147
Tabela 53 – Análise estatística do Teste de Tukey para as médias dos índices de vegetação.	148
Tabela 54 – Matrizes de Covariância e de Correlação entre o Índice de Anomalia de Chuva (RAI) e Índices de vegetação.	149
Tabela 55 – Matrizes de Covariância e de Correlação entre o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) e Índices de vegetação.	150

Tabela 56 – Matrizes de Covariância e de Correlação entre o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e Índices de vegetação.	151
Tabela 57 – Matrizes de Covariância e de Correlação entre o Índice de Aridez de Martonne (MIA) e Índices de vegetação.....	152
Tabela 58 – Matrizes de Covariância e de Correlação entre o Índice de Aridez de Thornthwaite (AI) e Índices de vegetação.	153
Tabela 59 – Matrizes de Covariância e de Correlação entre o Índice de Aridez de Áreas Suscetíveis a Desertificação (AI _{ASD}) e Índices de vegetação.....	154
Tabela 60 – Coeficiente de determinação (R^2) obtido na correlação pontual entre o Índice de Anomalia de Chuva (RAI) e os Índices de vegetação.....	156
Tabela 61 – Coeficiente de determinação (R^2) obtido na correlação pontual entre o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) e os Índices de vegetação.	157
Tabela 62 – Coeficiente de determinação (R^2) obtido na correlação pontual entre o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e os Índices de vegetação.....	158
Tabela 63 – Coeficiente de determinação (R^2) obtido na correlação pontual entre o Índice de Aridez de Martonne (MIA) e os Índices de vegetação.	159
Tabela 64 – Coeficiente de determinação (R^2) obtido na correlação pontual entre o Índice de Aridez de Thornthwaite (AI) e os Índices de vegetação.....	160
Tabela 65 – Coeficiente de determinação (R^2) obtido na correlação pontual entre o Índice de Aridez de Áreas Suscetíveis a Desertificação (AI _{ASD}) e os Índices de vegetação.	161

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	Thornthwaite Aridity Index
AI _{ASD}	Índice de Aridez de Áreas Suscetíveis a Desertificação
ALEPE	Assembleia Legislativa de Pernambuco
ANA	Agência Nacional de Águas
ANOVA	Análise de Variância
APA	Área de Proteção Ambiental
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ASD	Áreas Suscetíveis a Desertificação
CC	Capacidade de Campo do Solo
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
ECP	Estado de Calamidade Pública
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EVI	Índice de Vegetação Melhorado
FLONA	Floresta Nacional de Passo Fundo
GEE	Gases do Efeito Estufa
HIDROWEB	Sistema de Informações Hidrológicas
IA	Índice de Aridez
IAC	Índice de Anomalia de Chuva
IAM	Índice de Aridez de Martonne
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Inverse Distance Weighting
IET	Índice de Estado Trófico
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPP	Índice de Precipitação Padronizado
IQA	Índice de Qualidade da Água

ISSP	Índice de Severidade de Seca de Palmer
MIA	Martonne Index of Aridity
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
MVA	Análise Multivariada
NIR	Faixa de infravermelho próximo
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
ONU	Organização das Nações Unidas
PAN-Brasil	Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca
PDSI	Palmer Drought Severity Index
PERH-PE	Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RAI	Rainfall Anomaly Index
RVI	Índice de Vegetação pela Razão
SAR	Sistema de Acompanhamento de Reservatório
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo
SE	Situação de Emergência
SECTMA	Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente
SEMAS	Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade de Pernambuco
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SPEI	Índice Normalizado da Precipitação-Evapotranspiração
SPI	Standardized Precipitation Index
SR	Sensoriamento Remoto
SRHE	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco
SVI	Índice de Vegetação Padronizado
SWSI	Índice de Abastecimento de Água em Superfície
TM	Thematic Mapper
TOPODATA	Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil
UC	Unidade de Conservação
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification

UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura
UP	Unidade de Planejamento
UR	Umidade Relativa do Ar
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transversa de Mercator
VCÍ	Índice da Condição de Vegetação
VMS	Village Master Sampling
WMO	World Meteorological Organization
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	ABORDAGEM GERAL	21
1.1	INTRODUÇÃO	21
1.2	OBJETIVOS	25
1.2.1	Geral	25
1.2.2	Específicos	26
1.3	HIPÓTESE	26
2	REVISÃO DE LITERATURA	27
2.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS	27
2.2	NORMAIS CLIMATOLÓGICAS.....	29
2.3	SECA, ARIDEZ E DESERTIFICAÇÃO.....	33
2.4	SENSORIAMENTO REMOTO E ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	37
3	ÁREA DE ESTUDO	42
3.1	HIDROGRAFIA	43
3.2	CLIMATOLOGIA	47
3.3	GEOLOGIA	49
3.4	HIDROGEOLOGIA.....	50
3.5	GEOMORFOLOGIA E HIPSOMETRIA	52
3.6	PEDOLOGIA	55
3.7	COBERTURA VEGETAL	59
3.8	DESASTRES NATURAIS.....	60
4	MATERIAL E MÉTODOS	62
4.1	CONSISTÊNCIA DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS	62
4.2	TENDÊNCIA TEMPORAL	66
4.3	NORMAIS CLIMATOLÓGICAS.....	71
4.4	ÍNDICES DE SECA	72

4.4.1	Índice de Anomalia de Chuva (RAI)	72
4.4.2	Índice de Precipitação Padronizado (SPI)	73
4.4.3	Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)	76
4.5	ÍNDICES DE ARIDEZ	78
4.5.1	Índice de Aridez de Martonne (MIA)	78
4.5.2	Índice de Aridez de Thornthwaite (AI)	79
4.5.3	Índice de Aridez de Áreas Suscetíveis a Desertificação (AI_{ASD})	80
4.6	ÍNDICES DE VEGETAÇÃO POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO	81
4.6.2	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)	85
4.6.1	Índice de Vegetação Melhorado (EVI)	86
4.6.3	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI)	87
4.6.4	Índice de Vegetação Padronizado (SVI)	88
4.6.5	Índice da Condição de Vegetação (VCI)	89
4.7	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	90
4.7.1	Teste de Tukey	90
4.7.2	Correlação Espacial	91
4.7.3	Correlação Pontual	94
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	96
5.1	CONSISTÊNCIA DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS	96
5.2	TENDÊNCIA PLUVIOMÉTRICA	101
5.3	NORMAIS CLIMATOLÓGICAS	105
5.4	ÍNDICES DE SECA	107
5.5	ÍNDICES DE ARIDEZ	117
5.6	ÍNDICES DE VEGETAÇÃO POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO	126
5.7	TESTE DE TUKEY	145
5.8	CORRELAÇÃO ESPACIAL	148

5.9	CORRELAÇÃO PONTUAL	155
6	CONCLUSÕES	163
7	RECOMENDAÇÕES.....	166
	REFERÊNCIAS.....	167
	GLOSSÁRIO.....	184
	APÊNDICE A – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS VALORES DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO (NDVI, EVI, SAVI, SVI E VCI) NA BACIA DO RIO BRÍGIDA.	185
	APÊNDICE B – HIDROGRAMA DA PRECIPITAÇÃO ACUMULADA NOS 20 DIAS ANTERIORES A DATA DA IMAGEM DE SATÉLITE EMPREGADA NOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO (NDVI, EVI, SAVI, SVI E VCI) NA BACIA DO RIO BRÍGIDA.	188
	APÊNDICE C – INTERPOLAÇÕES IDW DOS ÍNDICES DE SECA EMPREGADOS NA CORRELAÇÃO ESPACIAL COM OS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO (NDVI, EVI, SAVI, SVI E VCI) NA BACIA DO RIO BRÍGIDA.	191
	APÊNDICE D – CORRELAÇÃO PONTUAL ENTRE O ÍNDICES DE SECA X ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA BACIA DO RIO BRÍGIDA...	197
	APÊNDICE E – CORRELAÇÃO PONTUAL ENTRE OS ÍNDICES DE ARIDEZ X ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA BACIA DO RIO BRÍGIDA.	212

1 ABORDAGEM GERAL

Nesse item será dada uma abordagem geral acerca da tese, contemplados pela introdução, objetivos e hipótese, os quais serão descritos a seguir.

1.1 INTRODUÇÃO

As terras secas como são conhecidas as terras áridas, semiáridas e subúmidas secas, cobrem cerca de 41% dos continentes e das ilhas do planeta e abrigam cerca de um terço da população mundial. Nessas áreas também estão localizadas a maior parte da pobreza, especialmente na África, na Ásia e na América Latina (CGEE, 2016). Desse modo, verifica-se que a problemática das terras secas não se trata, de um problema apenas no semiárido brasileiro, mas de um desafio global.

Segundo Marengo (2008), a região Nordeste ocupa 1.600.000 km² do território do Brasil, sendo 62% dessa área afetada pelo polígono das secas e 940.000 km² inseridos na região semiárida, onde vivem aproximadamente 30 milhões de pessoas, o equivalente a 15% da população nacional. Segundo Ribeiro e Santos (2016), o semiárido brasileiro é a região seca mais populosa do mundo, o que torna a ameaça a segurança hídrica, alimentar e energética um fator constante devido a ocorrência reiterada de secas.

Nesse contexto, se insere a área de estudo, a bacia hidrográfica do rio Brígida, que encontra-se oficialmente localizada na região semiárida do país, a qual é definida a partir de três critérios: média anual de precipitação pluviométrica inferior a 800 mm; Índice de aridez $\leq 0,5$; e risco de seca superior a 60%; de acordo com a Portaria nº 89 e nº 01 do Ministério da Integração Nacional (MIN, 2005a; MIN, 2005b).

Além das características supracitadas, o semiárido nordestino tem como traço principal, as frequentes secas que tanto podem ser caracterizadas pela ausência, escassez, pouca frequência e limitada quantidade, quanto pela simples má distribuição das chuvas durante o período do inverno. Dessa forma, não é rara a sucessão de anos seguidos de seca, segundo DNPM (2009).

Conforme os registros históricos de eventos hidrológicos extremos, da defesa civil, foram catalogados a ocorrência de 124 períodos de seca na região Nordeste, desde o século XVI até o século XXI (CEPED UFSC, 2015). Importante ressaltar que grande parte das secas severas registradas no Nordeste se deve a ocorrência do

fenômeno atmosférico oceânico El Niño, o qual aquece o oceano Pacífico através de corrente homônima e enfraquece os ventos alísios que transportam a umidade, o que favorece as variações na distribuição das chuvas em regiões tropicais de latitudes médias e altas (CPTEC, 2017; OLIVEIRA, 2001).

De acordo com Castro (2003) as estiagens, se comparadas às secas, são menos intensas se caracterizam pela menor intensidade e por menores períodos de tempo; ao passo que a seca, do ponto de vista meteorológico, é uma estiagem prolongada, caracterizada por provocar uma redução significativa das reservas hídricas existentes.

Como consequência da seca meteorológica prolongada, tem-se a seca hídrica, ocasionada pela redução das reservas hídricas existentes, dos cursos d'água, e dos reservatórios do lençol freático (CONDEPE/FIDEM, 2009). Esse déficit de água no solo, denominada seca agrícola, causa prejuízo à agricultura, e consequentemente a economia, que se caracteriza no semiárido pela pobreza e pela estagnação econômica.

Além da seca, a aridez é outro fator que contribui significativamente para a baixa disponibilidade hídrica da região da bacia do rio Brígida, haja vista que de acordo com Mainguet (1998), a aridez tem a ver com o clima de uma região e de suas consequências caracterizadas por pouca precipitação, vegetação pobre e elevada temperatura associada a um déficit hidrológico.

Sendo assim, o monitoramento da ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como secas e estiagens são cruciais para a identificação de períodos secos, evolução da aridez e aumento da susceptibilidade a desertificação.

De acordo com IPCC (2019), a desertificação é a degradação da terra em áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas, comumente conhecidas como terras secas, resultantes de muitos fatores, incluindo atividades humanas e variações climáticas. Segundo UNCCD (2014), o alcance e a intensidade da desertificação vêm aumentando em algumas áreas de terras secas ao longo das cinco últimas décadas.

De acordo com o Plano Estadual de Mudanças Climáticas (SEMAS, 2011), o Estado de Pernambuco possui 73% de seu território inserido nas Áreas Suscetíveis à Desertificação (ASD), ou seja, 135 dentre o total de 185 municípios do Estado estão nessa condição e nisso se inclui a bacia do rio Brígida.

Esse fato é bastante preocupante, pois segundo o IPCC (2014) é prevista uma redução de até 22% nos padrões de precipitação na região Nordeste do Brasil, associada a redução da ordem de 24,6% na vazão do rio São Francisco, onde o rio Brígida é tributário.

Aliado a isso, de acordo com as simulações do IPCC (2014) grandes regiões metropolitanas e pequenos municípios, do Nordeste brasileiro, serão influenciados de forma direta por fenômenos climáticos, como extremos de temperatura, secas, inundações, deslizamentos de terra, etc.

Ademais, as projeções indicam que a desertificação já atinge cerca de 13% do semiárido brasileiro e o cenário se agrava nas Áreas Suscetíveis a Desertificação (ASD) estabelecidas pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2007), onde a desertificação já alcança uma área equivalente a 1.488 municípios, 32 milhões de habitantes e 85% das pessoas pobres do país, segundo Buriti e Barbosa (2018).

Os cenários para o Nordeste em médio e longo prazo não são nada animadores, e a grande quantidade de registros de eventos hidrológicos extremos na região, destaca o tamanho da importância de ferramentas de acompanhamento e mitigação dos seus efeitos.

Maliva e Missimer (2012) ressaltaram que os índices de seca e aridez possuem elevada importância para rastrear os efeitos da mudança climática sobre os recursos hídricos locais, desde que se utilizem dados confiáveis e séries extensas o suficiente para identificar mudanças locais nos valores dos índices ao longo do tempo.

Além desses autores, diversos órgãos de cunho internacional como a World Meteorological Organization (WMO), Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (UNESCO), Convenção das Nações Unidas para o Combate à Desertificação (UNCCD) e a Organização das Nações Unidas (ONU) passaram a recomendar a utilização de vários índices de seca e de aridez para o monitoramento das regiões semiáridas e verificação da susceptibilidade a desertificação.

Dentre os existentes, os mais utilizados são os índices de Anomalia de Chuva (RAI), de Precipitação Padronizado (SPI), e de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) para a avaliação da seca; e os índices de Aridez de Martonne (MIA) e de Thornthwaite (AI), devido a facilidade de aplicação e a confiabilidade nos resultados. Além destes, os órgãos internacionais de pesquisa climática também recomendam o

uso do Porcentagem Normal, Decis e Índice de Abastecimento de Água em Superfície (SWSI), que devem ser empregados se o objetivo do trabalho for a análise de flutuações hidrológicas.

Nesse contexto, a comunidade científica, vem desenvolvendo inúmeras pesquisas acerca da ocorrência de secas e de aridez nas regiões semiáridas no Brasil e ao redor do mundo, a exemplo de Guenang e Kamga (2014); Felix (2015); Gao *et al.* (2015); Eshetu *et al.* (2016); Dabbaghi e Manjari (2017); Fiocruz (2017); Moral *et al.* (2017); Chowdhury (2018); Rodrigues *et al.* (2018); Pramudya *et al.* (2019) e Jesus *et al.* (2019).

Todas essas pesquisas denotam a importância do monitoramento dos eventos hidrológicos extremos, no contexto atual, sobretudo mediante os efeitos das mudanças climáticas, que reduzem a precipitação, aumentam a aridez e elevam a susceptibilidade ao processo de desertificação, tornando as terras secas improdutivas.

Nesse sentido, outra técnica que vem sendo constantemente utilizada para o acompanhamento do comportamento das secas e estiagens prolongadas, sobretudo na região Nordeste do país é o geoprocessamento, por meio de Sistema de Informações Geográficas (SIG) e de Sensoriamento Remoto (SR), pois permite uma melhor interpretação das condições ambientais mediante análise de imagens de satélite.

Meneses e Almeida (2012) mencionaram que o SR é uma das mais bem-sucedidas tecnologias de coleta automática de dados para o levantamento e monitoração dos recursos terrestres em escala global.

Tal feito se dá principalmente, porque atualmente, a resolução espectral das imagens obtidas pelos sensores imageadores evoluíram tanto, que já ultrapassa centenas de bandas, e a resolução espacial de muitas imagens já é menor que 1 metro, possibilitando suas aplicações nas áreas de levantamentos de recursos naturais e mapeamentos temáticos, monitoração ambiental, detecção de desastres naturais, desmatamentos florestais, previsões de safras, cadastramentos multifinalitários, cartografia de precisão, defesa e vigilância, entre outros usos.

Além disso, as informações obtidas nas imagens de satélite podem fornecer subsídios aos órgãos competentes, de modo a estabelecer ações que mitiguem os impactos das secas, e como a cada dia que passa a disponibilidade dessas imagens

no meio eletrônico se torna crescente, a realização de estudos de sensoriamento remoto está sendo mais frequente e de melhor qualidade.

Segundo Meneses e Netto (2001), a importância do sensoriamento remoto como ferramenta para avaliar os processos de desertificação fica mais evidente quando se verifica que, em escala global, um dos quatro indicadores utilizados pela Organização das Nações Unidas (ONU) para avaliar o problema são os índices de vegetação derivados de imagens de satélite, como por exemplo, o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI).

Tal premissa se baseia no fato de que os índices de vegetação podem indicar se os períodos secos estão se intensificando, requerendo planejamento de ações preventivas e mitigadoras quanto ao uso prioritário da água.

De modo similar ocorre com a evolução da aridez e áreas susceptíveis ao processo de desertificação, apontando locais onde é necessária a implantação de ações e programas que visem o uso adequado do solo, de modo sustentável.

Diante disso, o uso de ferramentas, como índices de seca e aridez podem contribuir significativamente na tomada de decisões pelos órgãos gestores para a gestão dos recursos hídricos, sobretudo nas regiões semiáridas.

Dessa forma, o presente trabalho visa analisar a partir de índices de seca, aridez e de vegetação se está ocorrendo um incremento de eventos hidrológicos extremos, como secas, no período de 1961-2016, e se há uma mudança na tendência histórica, assim como, um incremento da aridez e da susceptibilidade a desertificação na região da bacia do rio Brígida, localizada no semiárido Pernambucano.

1.2 OBJETIVOS

A seguir serão apresentados os objetivos geral e específicos que se pretende alcançar mediante o desenvolvimento do presente trabalho.

1.2.1 Geral

Estimar a ocorrência de seca e aridez na bacia hidrográfica do rio Brígida e avaliar a susceptibilidade à desertificação mediante índices físicos e de sensoriamento remoto.

1.2.2 Específicos

- ✓ Analisar se há mudança de tendência na precipitação, nos índices de seca, de aridez e de vegetação na escala temporal através do software TREND;
- ✓ Testar diferentes metodologias de índices de seca (RAI, SPI e PDSI) e de aridez (MIA, AI e AI_{ASD}) e avaliar qual se adéqua melhor estatisticamente à bacia do rio Brígida;
- ✓ Identificar por meio dos índices de seca e de aridez os períodos secos e úmidos e avaliar se há correlação com os índices de vegetação (NDVI, EVI, SAVI, SVI e VCI);
- ✓ Verificar se há propensão à desertificação baseado nos resultados obtidos dos índices de seca, aridez e vegetação.

1.3 HIPÓTESE

A partir do uso de dados *in loco* é possível estimar índices de seca e aridez, e associá-los a índices de vegetação para quantificar a ocorrência de seca e aridez, e, consequentemente verificar a propensão do território da bacia hidrográfica à desertificação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A seguir serão abordados conceitos técnicos e pesquisas científicas acerca dos principais temas relacionados ao desenvolvimento da tese.

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Desde o século XIX a partir da Revolução Industrial, o homem passou a utilizar máquinas para desenvolver seus processos fabris, assim como, se locomover, o que acarretou a emissão continuada de dióxido de carbono (CO₂), um dos gases responsáveis pelo efeito estufa, principal elemento de causa das mudanças climáticas em escala global atualmente.

No Brasil, além do elemento supracitado, outros fatores que contribuíram consideravelmente para a liberação de CO₂ na atmosfera foram os desmatamentos de florestas naturais, sobretudo na região Norte do país para a venda de madeira ilegal e, na região Nordeste, para a expansão da agropecuária, principalmente a bovinocultura e cultivo de cana-de-açúcar.

A intensificação da ocorrência de eventos relacionados à possível mudança climática associada à desenfreada utilização de recursos naturais para o desenvolvimento socioeconômico fez com que surgisse a necessidade de monitoramento da evolução desses processos ao longo do tempo.

Sendo assim, no ano de 1988, a *World Meteorological Organization* (WMO) em conjunto com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) criaram o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) para fornecer informações científicas com base em estudos realizados sobre o clima e suas mudanças em um período futuro.

Aliado a isso, outros eventos relacionados à proteção do meio ambiente foram sendo realizados, como por exemplo, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD) ou simplesmente ECO-92 (Cúpula da Terra) que ocorreu no Brasil em 1992, onde foram debatidas com os principais chefes de Estado do mundo quais medidas deveriam ser tomadas para amenizar os efeitos das mudanças climáticas, dentre elas foram propostas a Agenda 21 e a redução de emissão de gases do efeito estufa – GEE (dióxido de carbono, metano e óxido nitroso), sendo esta última ratificada através do Protocolo de Kyoto criado em 1997 e vigorado em 2005.

Os relatórios do IPCC a cada nova versão deixam explícitos que os cenários futuros são ruins, sobretudo para as regiões áridas e semiáridas onde as mudanças climáticas serão mais drásticas, principalmente no que se refere à elevação de temperatura e diminuição da incidência de chuvas, as quais afetarão de modo direto a disponibilidade hídrica, que já é atualmente escassa, como é o caso da bacia hidrográfica do rio Brígida que em 2017 se encontrava com 72% (13/18) de seus reservatórios em situação de colapso, e quem em 2020 tem 44% (8/18) de seus mananciais com no máximo 20% de sua capacidade de acumulação, segundo os dados de monitoramento da Agência Nacional de Águas (ANA, 2020).

Além disso, os relatórios do IPCC (2014; 2019) descrevem que as mudanças climáticas poderão afetar de modo significativo a cobertura vegetal, principalmente em áreas de Caatinga, como é o caso da bacia do rio Brígida, tornando os terrenos mais suscetíveis a processos de desertificação, o que afetará diretamente a qualidade dos solos e conseqüentemente a quantidade de terras produtivas acarretando na diminuição da produção agrícola.

Diante dessa situação a necessidade de estudos acerca de mudanças climáticas se torna cada vez mais essencial para observar de perto quais elementos serão afetados e quais medidas podem ser tomadas a fim de minimiza-las.

Nesse contexto, inserem-se os dados das normais climatológicas padronizadas que auxiliam na avaliação de mudança de tendências, assim como as normais climatológicas provisórias, que ajudam na compreensão dos elementos climáticos mais recentes, tais como temperatura, precipitação, umidade, insolação, evapotranspiração, velocidade do vento, cruciais aos estudos dos recursos hídricos.

Importante ressaltar que esses dados podem auxiliar na elaboração de índices de seca, os quais permitem uma análise detalhada acerca da ocorrência e intensidade de eventos hidrológicos extremos, como a seca.

Aliado a isso, o emprego de índices de aridez possibilita uma avaliação da evolução da aridez no local, o que pode contribuir consideravelmente, em médio e longo prazo para a inserção definitiva da bacia hidrográfica nas áreas suscetíveis a processos de desertificação (ASD).

Outro elemento que corrobora com a utilização desses índices, é a sua aplicação de modo constante pela comunidade científica, *World Meteorological Organization* (WMO) e Organização das Nações Unidas (ONU), que o empregam para o acompanhamento das mudanças climáticas e dos processos de

desertificação global inclusive unindo técnicas de sensoriamento remoto, como é o caso do acompanhamento da cobertura vegetal mediante a utilização de imagens de satélite.

2.2 NORMAIS CLIMATOLÓGICAS

Segundo *World Meteorological Organization* (WMO, 1989), dados climáticos são frequentemente mais úteis quando são comparados a valores normais ou padrão. A regulação técnica da WMO estabelece dois conceitos, a de Normal, como sendo médias de período calculadas para um período relativamente longo e uniforme que deve compreender no mínimo três períodos consecutivos de 10 (dez) anos; e a de Normal Climatológica Padronizada, como sendo a média de dados climatológicos calculados para períodos consecutivos de 30 anos da seguinte forma: 1 de janeiro de 1901 a 31 de dezembro de 1930, 1 de janeiro de 1931 a 31 de dezembro de 1960, 1 de janeiro de 1961 a 31 de dezembro de 1990, e assim por diante.

A WMO estabeleceu que nos casos onde não haja dados disponíveis recentes para a Normal Climatológica Padronizada quer seja porque a estação foi desativada, ou por outro motivo qualquer, deve-se calcular a Normal Provisória, que é definida como as médias de curto prazo obtidas a partir de observações que se estendem ao longo de um período de no mínimo 10 (dez) anos.

Os principais elementos climatológicos avaliados nas Normais Climatológicas são a precipitação total (mm), o número de dias de chuva com precipitação maior ou igual a 1 mm, temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C) e temperatura média (°C), pressão atmosférica (hPa), insolação total (h), evaporação (mm), nebulosidade (décimos), umidade relativa (%), direção e velocidade do vento.

Segundo INMET (2009), as observações meteorológicas no Brasil só foram realizadas de modo sistemático a partir de 1910 pelo Escritório de Meteorologia do Ministério da Agricultura, o qual publicou no ano de 1970 as primeiras normais climatológicas do Brasil, do período de 1931-1960. Posteriormente, no ano de 1992, o Departamento Nacional de Meteorologia do Ministério da Agricultura e Reforma Agrária publicou as normais do período de 1961-1990. Em seguida, no ano de 2000, foi criado o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgão responsável pela correção dos erros e inconsistências das normais anteriormente publicadas, assim como, da sistematização do banco de dados meteorológicos do país.

Os elementos climatológicos das normais são muito importantes, pois podem ser utilizados de diversas formas em vários setores, tais como: auxiliar na definição de períodos secos e úmidos de uma região; identificar o melhor período de plantio para cada cultura; estimar o balanço hídrico para avaliação de demanda e disponibilidade local; propiciar estimativas de índice de seca e de aridez para acompanhamento de estiagem; identificar os dias trabalháveis com máquinas no campo na agropecuária, dentre outros.

Aliado a isso, os estudos das normais climatológicas, permite uma avaliação da variação climática em diversas regiões ao redor do planeta, sobretudo na região semiárida, a qual possui elevada suscetibilidade a desertificação.

Em um dos vários estudos que empregam as normais climatológicas, Ramos *et al.* (2010), observaram que de modo geral, há uma forte influência da latitude na temperatura média para cidades situadas ao longo do território do Brasil, como Macapá (AP), Porto Alegre (RS) e Belo Horizonte (MG), sendo que na primeira cidade as temperaturas pouco oscilam e se mantêm elevadas o ano inteiro, a segunda cidade apresentou uma variação notável de temperatura na estação do verão em comparação a de inverno, e a terceira cidade apresentou verões e invernos suaves sem grandes oscilações.

Baratto *et al.* (2016), ao analisarem e compararem a série histórica da precipitação pluviométrica das estações meteorológicas convencionais localizadas nos municípios de Passo Fundo e Cruz Alta, ambos inseridos na bacia hidrográfica do Alto Jacuí, verificaram que existe uma grande variabilidade entre as duas estações, que se deve provavelmente a variação altimétrica entre elas, aliado a isso, ambas as estações apresentaram maior quantitativo de precipitação no período da primavera.

Moraes *et al.* (2005), realizaram estudos das normais climatológicas do Estado do Pará (15 estações) para identificar a variação espacial e temporal da precipitação de modo a auxiliar no planejamento das atividades agrícolas e verificaram a ocorrência de variação espacial para a estação seca e chuvosa, sugerindo a utilização de calendários agrícolas distintos, haja vista que as datas de plantio para as culturas anuais recomendadas oscilaram entre a primeira semana de novembro até a última semana de dezembro.

Medeiros *et al.* (2005), utilizaram dados de temperatura do ar (mínima, média e máxima) mensal e anual de 74 estações meteorológicas convencionais localizadas

na região Nordeste a fim de fornecer subsídios para o planejamento agroclimático e observaram que os valores do coeficiente de determinação (R^2) da equação quando utilizados para altitudes muito elevadas, tenderam a apresentar baixos valores de temperatura do ar, enquanto que as equações ajustadas conforme sua espacialização se mostraram uma alternativa viável para a ampliação da base de dados climáticos da região Nordeste.

Cardoso *et al.* (2012), avaliaram a variabilidade e a tendência temporal de algumas variáveis climáticas, como temperatura máxima, mínima e média do ar, horas de frio (abaixo de 7°C), precipitação pluvial e umidade relativa do ar para identificar as condições ideais de cultura de macieiras dos grupos Gala e Fuji, na região de Vacaria – RS e concluíram que há uma tendência temporal significativa de aumento da temperatura mínima do ar e redução do número de horas de frio, enquanto que a precipitação pluvial média da primavera apresentou tendência temporal significativa de aumento.

Oliveira *et al.* (2006), utilizaram dados das normais climatológicas e geotérmicas para detectar mudanças no microclima da cidade de Manaus (AM), e verificaram que houve um incremento na temperatura média do ar de $0,27 \pm 0,04$ °C, durante os últimos 80 anos, contudo esse aumento não é contínuo, mas influenciado pela frequência de eventos de El Niño, La Niña e outros fenômenos detectados no Oceano Pacífico tropical.

Cardoso *et al.* (2006), visando caracterizar o comportamento hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Debossan, no trecho inserido na Reserva Ecológica de Macaé de Cima, no município de Nova Friburgo, Rio de Janeiro empregaram dados das normais climatológicas associados a dados de vazão e precipitação diários, e verificaram que a precipitação pluviométrica na bacia, com base nas normais climatológicas, é dividida em dois períodos bem definidos, ou seja, os meses de maior pluviosidade (outubro a março), com valor médio de 275 mm e de menor pluviosidade (abril a setembro), com valor médio de 73 mm. Aliado a isso, os mesmos autores também observaram que os índices pluviométricos do período de estudo em relação às normais climatológicas provavelmente provocaram grande diferença entre a vazão no período chuvoso e o período de estiagem; e que a precipitação no período de estudo foi bastante superior às normais climatológicas, indicando que esse período é atípico em termos quantitativos de chuva.

Müller *et al.* (2014), com o intuito de caracterizar o crescimento e acúmulo de biomassa de um remanescente de Floresta Ombrófila Mista, localizado na Floresta Nacional de Passo Fundo (FLONA), no município de Mato Castelhano no Rio Grande do Sul, empregaram dados das normais climatológicas para verificar se a precipitação e temperatura do ar influenciariam no crescimento das espécies de árvores inseridas no local. Esses autores verificaram que nos dois períodos de tempo analisados (outubro de 2009 a outubro de 2010 e novembro de 2010 a janeiro de 2012), as condições meteorológicas foram acima das normais climatológicas da região (temperatura média do ar de 17,7°C e precipitação pluvial de 1.803 mm), com maior variação no tocante à precipitação pluvial, o que influenciou muito pouco no aumento da área basal e da biomassa da floresta.

Clemente *et al.* (2017), tentando compreender a distribuição da precipitação pluviométrica na microbacia hidrográfica do rio Carnaíba de Dentro e seu entorno, no semiárido baiano, empregaram dados de 05 (cinco) estações meteorológicas convencionais no período de 2009 a 2014 associados aos dados das normais climatológicas padronizadas de 1961-1990. Os autores concluíram que houve uma irregularidade espaço-temporal da distribuição de chuvas na microbacia do Rio Carnaíba de Dentro e seu entorno, nos anos de 2009 a 2014, ocasionados possivelmente, pela presença de chuvas torrenciais nos meses de outubro (2009), novembro (2012) e dezembro (2013), ou seja, elevada concentração de chuvas em um curto intervalo de tempo.

Amorim e Carlo (2017), analisaram se as diversas propostas de zoneamento bioclimático brasileiro se aplicam as condições da Região de Colatina no Espírito Santo. Para tanto, os autores empregaram dados das normais climatológicas e o método definido na ABNT NBR 15220-3 para definição de bioclima e, verificaram que, o método escolhido interfere diretamente na classificação climática de Colatina, fazendo com que a região estudada seja classificada na mesma zona climática, ou em zonas diferentes, das cidades próximas.

Diante de todas as pesquisas acima apresentadas verifica-se a importância dos dados das normais climatológicas, tanto na escala padronizada como na provisória para o entendimento do comportamento ambiental dos recursos naturais, assim como, na compreensão de variações climáticas e no auxílio às atividades agrícolas funcionando como instrumento para proposição de medidas de gestão.

Aliado a isso, as normais contribuem consideravelmente para o monitoramento de eventos hidrológicos extremos, a exemplo de inundações, enxurradas, estiagens e secas, bem como, na definição de períodos secos e úmidos, cruciais para a compreensão climatológica de bacias hidrográficas.

2.3 SECA, ARIDEZ E DESERTIFICAÇÃO

Segundo WMO (2005), a seca é um período prolongado de precipitação deficiente que resulta em danos extensos as culturas, resultando ainda em perda de rendimento agrícola. A seca pode ser meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica.

A seca meteorológica é definida em função do grau de estiagem e duração do período seco; enquanto que a seca agrícola relaciona as características da seca meteorológica com os impactos na agricultura, sendo definida quando ocorrem além de escassez de precipitação, diferenças entre evapotranspiração real e potencial e perda de umidade do solo; ao passo que a seca hidrológica está associada à bacia hidrográfica, onde os períodos de precipitação são insuficientes ao reabastecimento de água superficial ou subterrânea; e a seca socioeconômica ocorre quando a escassez de água passa a afetar as pessoas, de modo individual ou coletivo (WMO, 2005).

A seca é um fenômeno que assola de modo recorrente a região semiárida do Nordeste do Brasil, sobretudo a mesorregião do sertão de Pernambuco, onde a bacia do rio Brígida está inserida.

Tal assertiva pode ser ratificada mediante os registros da Defesa Civil (Brasil, 2020), no período de 1991-2019, onde notou-se que os municípios que compõem a bacia do rio Brígida, obtiveram cerca de 413 registros de Situação de Emergência (SE) e Estado de Calamidade Pública (ECP) de estiagem e seca.

Ressalta-se que tais registros são baseados na definição da Defesa Civil, de que os eventos de seca e estiagem se caracterizam por períodos prolongados de baixa ou ausência de chuvas durante tempo suficiente, em uma determinada região, para que a falta de precipitação provoque grave desequilíbrio hidrológico, de modo que atinjam caráter de emergência ou de calamidade pública, que podem ser reconhecidos segundo as determinações previstas no Decreto 7.257 de 04/08/2010, no art. 2º, incisos III e IV (CENAD, 2012).

Além da seca, a aridez também assola a região de estudo. Importante frisar que a aridez não deve ser confundida com a seca, pois segundo WMO (2005) seca é uma característica normal e recorrente do clima, apesar de ser erroneamente considerada como um evento raro e aleatório, enquanto que aridez se remete a regiões de baixa precipitação, ou seja, é uma característica permanente do clima, embora ambos afetem principalmente de forma mais intensa as regiões de terras secas.

A grande quantidade de períodos de seca, associado a aridez da região descreve o tamanho da importância de ferramentas para o monitoramento da susceptibilidade a desertificação.

Sendo assim, a UNESCO (1979) tem utilizado o índice de aridez (AI) de Thornthwaite que se baseia em dados de precipitação e evapotranspiração para quantificar o déficit ou superávit de água em determinada região. Esse teste serve para auxiliar na identificação de regiões áridas, hiperáridas, semiáridas e subúmidas secas, as quais são mais suscetíveis às mudanças climáticas, assim como, aos processos de desertificação.

Fernandes *et al.* (2009) mencionam que além do índice de aridez (AI), outros testes que são bastante difundidos e vem sendo aplicados com sucesso são os índices de aridez de Martonne (MIA) e o de Chuva de Lang (Lang Rainfall Index).

Atualmente, o monitoramento da aridez tem se tornado fundamental para o estabelecimento de medidas de prevenção global a desertificação, a qual é definida de acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU, 2011) como sendo um fenômeno que está relacionado à degradação persistente dos ecossistemas das terras arenosas pelas atividades humanas, tais como: agricultura, mineração, pecuária, degradação do solo e mudanças climáticas.

A *United Nations Convention to Combat Desertification* (UNCCD, 2014) descreve que a desertificação é uma crise silenciosa e invisível que está desestabilizando comunidades em escala global, assim como os efeitos das mudanças climáticas, pois prejudica os meios de subsistência e acaba gerando conflitos principalmente pelo uso da água.

Sendo assim, o acompanhamento da ocorrência de seca, aridez e desertificação é de fundamental importância para a tomada de decisões, sobretudo no tocante a gestão dos recursos hídricos, haja vista que impactam diretamente a

demanda de abastecimento humano local, a produtividade agrícola e a pecuária, os quais incorrem em inúmeros prejuízos socioeconômicos.

Apesar de não existir um índice de desertificação com metodologia consolidada, devido a sua elevada complexidade, haja vista que envolve além de elementos climáticos, os fatores antrópicos, existem maneiras de se efetuar o seu acompanhamento, como a utilização de índices de aridez, e o emprego do sensoriamento remoto por meio de imagens de satélite.

No Brasil, uma das medidas adotadas para o acompanhamento da evolução desse fenômeno foi à criação do Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca – PAN-Brasil (MMA, 2005), o qual relata em seu diagnóstico que o Estado de Pernambuco possui 73% de seu território em áreas semiáridas suscetíveis a desertificação, fato este extremamente preocupante, haja vista as condições constantes de déficit hídrico.

Diante disso, o Estado de Pernambuco criou a Política Estadual de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca por meio da promulgação da Lei nº 14.091 de 2010 e a Política estadual de Mudanças Climáticas de Pernambuco através da Lei 14.090 de 2010 (ALEPE, 2010a; ALEPE, 2010b).

Contudo, apesar de existir arcabouço legal específico para o tema, exigindo inclusive criação de programas que preveem a aplicação de medidas para atenuar esses eventos, muito pouco na prática tem sido efetivamente realizado, devido à ausência de políticas públicas, o que requer uma maior intensidade de pesquisas nesse setor.

Dentre os diversos estudos realizados para investigar a seca, Blain e Brunini (2005), verificaram que o índice de severidade de seca de Palmer (PDSI) é uma ferramenta consistente para o monitoramento da seca meteorológica, na escala mensal no Estado de São Paulo. Os autores constataram também que o índice de Precipitação Padronizada (SPI) é um método apropriado para a quantificação do déficit de precipitação pluvial, em diversas escalas de tempo, e que deve, portanto, ser utilizado em decisões governamentais de planos de combates aos efeitos do fenômeno natural seca.

Santos *et al.* (2017) visando determinar os principais padrões de variabilidade climáticas associados aos eventos secos e chuvosos na Amazônia Oriental, verificaram a existência de três regiões homogêneas mediante a aplicação do índice de precipitação normalizada (SPI), o qual indicou mais eventos secos na região do

litoral e mais eventos chuvosos nas regiões central e sul, sugerindo que tais ocorrências estão associadas a variabilidade climática do fenômeno dos oceanos Atlântico (Gradiente do Atlântico) e Pacífico (ENOS).

Oliveira Júnior *et al.* (2017), analisaram a relação entre Índice de Precipitação Padronizada (SPI) e os Relatórios de Ocorrência de Incêndios (ROI) no Parque Nacional do Itatiaia (PNI) e verificaram que os meses críticos de focos de calor foram julho (17%), setembro (23,2%) e agosto (31,9%), independente da estação usada.

Blain e Kayano (2011), estudaram a variabilidade do Índice de Precipitação Padronizada (SPI) mensal, na localidade de Campinas-SP, entre os anos de 1890 a 2007 e observaram que não há influência do fenômeno El Niño / Oscilação Sul na variabilidade climática da área de estudo, assim como, há uma tendência de intensificação nas condições de déficit de precipitação pluvial no mês de agosto, enquanto que nos demais meses não houve alterações significativas, sugerindo que o SPI é um interessante índice alternativo na investigação de forças climáticas condicionantes/moduladoras do clima de determinada região.

Farias *et al.* (2017), tentando caracterizar e analisar as secas e seus impactos no município de Boqueirão no Estado da Paraíba, utilizaram o Índice Padronizado de Precipitação (IPP) com dados de precipitação no período de 1963 a 2014, onde observaram que as secas mais graves ocorreram nos anos de 1980-1982, 1998-2000 e 2012-2013.

Ferrelli *et al.* (2017), caracterizaram a variabilidade climática em escala temporal da costa Norte do Estuário da Baía Blanca na Argentina por meio do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) e concluíram que houve um incremento na temperatura em torno de 0,9°C, elevação da umidade relativa do ar e coincidência das precipitações, assim como, dos períodos secos e chuvosos com a ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña no período de 1986 a 2010.

Antonio (2017) estudou a caracterização climática no entorno de Manaus - AM através de alguns índices climáticos pluviométricos e termopluviométricos, e verificou que o Índice de Anomalia de Chuva (RAI) apresentou resultados classificados na faixa extrema de seca e de chuva para a região. Além disso, observou que o Diagrama Termopluviométrico de Gaussen não conseguiu caracterizar claramente os meses secos, da mesma forma que o índice anual de aridez de Martonne não apresentou acurácia suficiente para caracterizar os meses secos na região classificando o clima local como Superúmido.

Alves *et al.* (2017), utilizaram indicadores socioeconômicos para avaliar a desertificação no alto curso da bacia hidrográfica do rio Paraíba, e verificaram que os valores médios do indicador socioeconômico municipal (Ise_m) sugerem degradação das terras em todo o alto curso da bacia hidrográfica, porém predominantemente em níveis baixos, sendo a região noroeste a área com maior pressão antrópica, aliado a isso, verificou-se uma tendência de aumento do índice socioeconômico no alto curso da bacia hidrográfica (Ise_b), com valor médio que indica uma situação de degradação moderada.

Cheval *et al.* (2017), avaliaram a variabilidade da aridez no Sudeste Europeu e concluíram, por meio do índice de aridez de Martonne para os anos de 1961-2050, que haverá um incremento nos níveis de aridez em determinadas áreas, como no Sudeste da Itália, Grécia e Turquia.

Mediante a apresentação dos estudos supracitados relacionados à seca, aridez e desertificação verifica-se a importância dessa temática para a manutenção dos recursos naturais, sobretudo dos recursos hídricos essenciais à sobrevivência humana.

Sendo assim, a proposição de pesquisas que utilizem esses elementos associados poderá se tornar uma ferramenta capaz de fornecer elementos que subsidiarão a tomada de decisão pelos órgãos gestores, visando, sobretudo amenizar os efeitos da seca, aridez e desertificação em bacias hidrográficas situadas em regiões semiáridas.

2.4 SENSORIAMENTO REMOTO E ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Segundo Florenzano (2011), Sensoriamento Remoto (SR) é a tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre, por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície. O termo sensoriamento refere-se à obtenção por meio de sensores instalados em plataformas terrestres, aéreas (aeronaves) e orbitais (satélites artificiais); enquanto que o termo remoto significa a distância, sem o contato físico entre o sensor e o objeto na superfície terrestre.

Os sistemas de sensoriamento remoto disponíveis atualmente fornecem dados consistentes da superfície da Terra, os quais são de grande utilidade para diversas aplicações nas mais variadas áreas, como por exemplo, arquitetura no auxílio com planejamento urbano; agronomia, com avaliação dos solos e condição

das culturas; cartografia, no mapeamento topográfico e temático; hidrológico, com a avaliação de áreas afetadas por eventos hidrológicos extremos, como enchentes, secas, inundações e enxurradas, e identificação de setores de consumo de água por tipo de uso para estudos de demanda, dentre muitas outras, conforme descreve Novo (2010).

Além das aplicações supracitadas, o sensoriamento remoto também pode servir para avaliação da seca e aridez e/ou análise de evolução de processos ambientais influenciados pela ação antrópica, como a desertificação, que vem sendo comumente estudada mediante o emprego de índices de vegetação.

Os cientistas desenvolveram os índices de vegetação para monitorar e quantificar as condições e distribuições espaciais das vegetações usando os dados digitais de reflectâncias espectrais da radiação eletromagnética (Liu, 2015).

Essa interação entre a radiação eletromagnética e a vegetação só é possível, pois as plantas possuem pigmentos fotossintetizantes (clorofila, xantofila e caroteno) que absorvem significativamente a radiação na faixa do visível - VIS (0,4 a 0,7 μm) e refletem na faixa de infravermelho próximo – NIR (0,7 a 1,1 μm), segundo Ponzoni *et al.* (2012).

Bannari *et al.* (1995), descreveram que foram desenvolvidos mais de quarenta tipos de índices de vegetação para explorar as aplicações das reflectâncias espectrais no monitoramento da vegetação ao longo dos últimos 20 anos, e que os primeiros índices foram baseados nas imagens oriundas dos satélites Landsat.

Dentre os diversos índices de vegetação existentes, os mais utilizados na comunidade científica são o Índice de Vegetação pela Razão (RVI), o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Vegetação Melhorado (EVI), o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), e o Índice da Condição de Vegetação (VCI) devido a poucas informações necessárias para a sua análise.

Atualmente, com o avanço da tecnologia, a disponibilização de imagens de satélite de modo gratuito e a elevação da acurácia dos softwares utilizados na análise de sensoriamento remoto, tornaram os índices de vegetação não somente uma ferramenta essencial de monitoramento, mas também um indicador das condições ambientais para tomada de decisões.

Ferreira *et al.* (2017) descreveram que o uso de imagens de satélite é, na escala de tempo e espaço, uma excelente técnica para definir áreas de desertificação no Nordeste brasileiro e compreensão do nível de degradação

ambiental das terras secas através da utilização de índices de vegetação, como por exemplo, o Índice da Condição de Vegetação (VCI).

Lourenço *et al.* (2017), tentando identificar modificações temporais na Caatinga preservada aplicaram o NDVI, na bacia experimental de Aiuaba no Estado do Ceará e concluíram que a área de estudo, mesmo sob condições de preservação, apresentou modificações sazonais nos valores de NDVI. Além disso, verificaram que há uma inter-relação entre a variação do NDVI e o período do ano, sendo que as alterações são reflexos da área foliar da Caatinga e não da densidade da vegetação.

Cordeiro *et al.* (2017), avaliaram a dinâmica espaço-temporal dos grandes grupos vegetais do Rio Grande do Sul mediante aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) visando agrupar regiões homogêneas com base na variabilidade temporal do NDVI e no padrão de variabilidade anual do NDVI dos diferentes grupos a partir de imagens do satélite NOAA no período de 1982 a 2008. Os resultados da pesquisa mostraram que os grupos são caracterizados por um padrão sazonal típico, porém, com variações de amplitude de NDVI entre eles, o que possibilita monitorar as variações fenológicas da vegetação em decorrência da sua dinâmica temporal.

Gomes *et al.* (2017), realizaram análise dinâmica nos campos de fluxo de calor no solo, albedo e temperatura da superfície com intervalo de 10 anos, para a região de Ilha Solteira, no Estado de São Paulo, mediante o emprego de imagens de satélite Landsat-5 sensor TM (Thematic Mapper) e dos índices de vegetação NDVI e SAVI. Os autores concluíram que houve elevação da temperatura da superfície, do albedo e do fluxo de calor do solo para a área de estudo, e que esse aumento pressupõe o aparecimento de ilhas de calor, fenômeno ligado à urbanização do ambiente, e consequentemente, indicativos de mudança na cobertura vegetal da região quer seja pela supressão da mata nativa ou pela substituição das culturas agrícolas praticadas.

Miranda *et al.* (2017), mensuraram de forma indireta a complexidade e a heterogeneidade do mosaico de habitats das sub-regiões do Pantanal, por meio do sensoriamento remoto através de imagens do satélite MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) nos anos de 2000, 2008 e 2015. Os autores verificaram maior heterogeneidade (NDVI desvio padrão) na sub-região pantaneira do Tuiuiú, sendo o valor igual a 0,19 (anos 2000 e 2015) e 0,21 (ano 2008), o que implica dizer

que a região tem a maior heterogeneidade horizontal quando comparada com as demais sub-regiões. Aliado a isso, os autores concluíram que o uso de NDVI na estimativa de parâmetros da paisagem é uma ferramenta eficiente em habitats do Pantanal, e que pode ser replicável em outras regiões.

Salimon e Anderson (2017), analisaram a variabilidade climática em 40 locais com a cobertura vegetal natural no Estado da Paraíba mediante análise de dados de chuva do projeto TRMM e de imagem de satélite onde se estimou o índice de Vegetação Melhorado (EVI). Os mesmos autores observaram que houve uma redução da cobertura vegetal de 25% no período de 2001 a 2012, e se essa diminuição persistir em longo prazo associada a redução das chuvas, pode levar a cobertura vegetal local a uma condição xerófila.

Liaqat *et al.* (2017), utilizaram imagens dos satélites MODIS e Landsat-8 para estimar o Índice de vegetação ajustada ao solo (SAVI), Índice de Vegetação Modificada (MSAVI), Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetação Melhorado (EVI) para avaliar a melhor forma de identificar o rendimento das culturas de trigo na bacia do Paquistão. Os resultados revelaram que dentre os índices usados, o SAVI mostrou uma associação bastante aceitável com o rendimento relatado pela Village Master Sampling (VMS) em campo quando comparado com os outros índices, se tornando uma medida rápida e confiável para estimativas das áreas de trigo no Paquistão.

Masselink *et al.* (2017), aplicaram metodologia baseada em sensoriamento remoto para detectar mudanças ambientais nas condições de pastagem ecológica na bacia hidrográfica de Unkur, no Quirguistão mediante emprego dos índices de vegetação melhorado (EVI), de vegetação ajustada ao solo (SAVI) nas imagens de satélite Landsat. Os autores concluíram que os resultados dos índices apresentaram padrões de tendência muito semelhantes e que apesar da necessidade de uma validação mais robusta, o estudo conseguiu confirmar o elevado potencial que o sensoriamento remoto possui para detectar mudanças nas condições de pastagem ecológica na região.

Liang *et al.* (2017), realizaram análise espaço-temporal de condições de seca vegetativa mediante o emprego de índice da condição de vegetação (VCI) estimados a partir de imagens de satélite NOAA no período de 1981 a 2015 e verificaram que na China ocorrem apenas pequenos períodos de seca leve ou moderada, o que se deve ao efeito das monções na região.

Gouveia *et al.* (2017), analisaram os impactos da seca sobre a vegetação da bacia mediterrânea mediante o emprego dos Índices de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) e do Índice Normalizado da Precipitação-Evapotranspiração (SPEI) em diferentes escalas de tempo (1 a 24 meses) no período de 1982 a 2006. Os autores verificaram que os resultados mais severos de vegetação estão localizados em áreas cujo balanço hídrico enfatiza a necessidade de um sistema de seca de alerta precoce que cubra toda a Bacia do Mediterrâneo.

Diante de todos os trabalhos acima apresentados empregando tecnologias de sensoriamento remoto no Brasil e em vários locais do mundo tem-se uma pequena dimensão acerca da importância do emprego de índices de vegetação em estudos para avaliação de condição climática, fenômenos meteorológicos, degradação das terras, diminuição da cobertura vegetal, dentre outras possibilidades.

3 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Brígida ou Unidade de Planejamento Hídrico (UP11), de acordo com a denominação adotada no Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco (PERH-PE) está localizada no Estado de Pernambuco, na Região Nordeste do Brasil, na mesorregião do Sertão Pernambucano e na microrregião de Araripina e Salgueiro (SECTMA, 1998).

Segundo SECTMA (2006), a bacia está compreendida entre as coordenadas geográficas 07°19'02" e 08°36'32" de Latitude Sul e 39°17'33" e 40°43'06" de Longitude Oeste, fazendo fronteira ao Norte com o Estado do Ceará, a Oeste com o Estado do Piauí, a Leste com a bacia do rio Terra Nova (UP10) e ao Sul com a bacia do riacho das Garças (UP12), conforme apresentada na Figura 1.

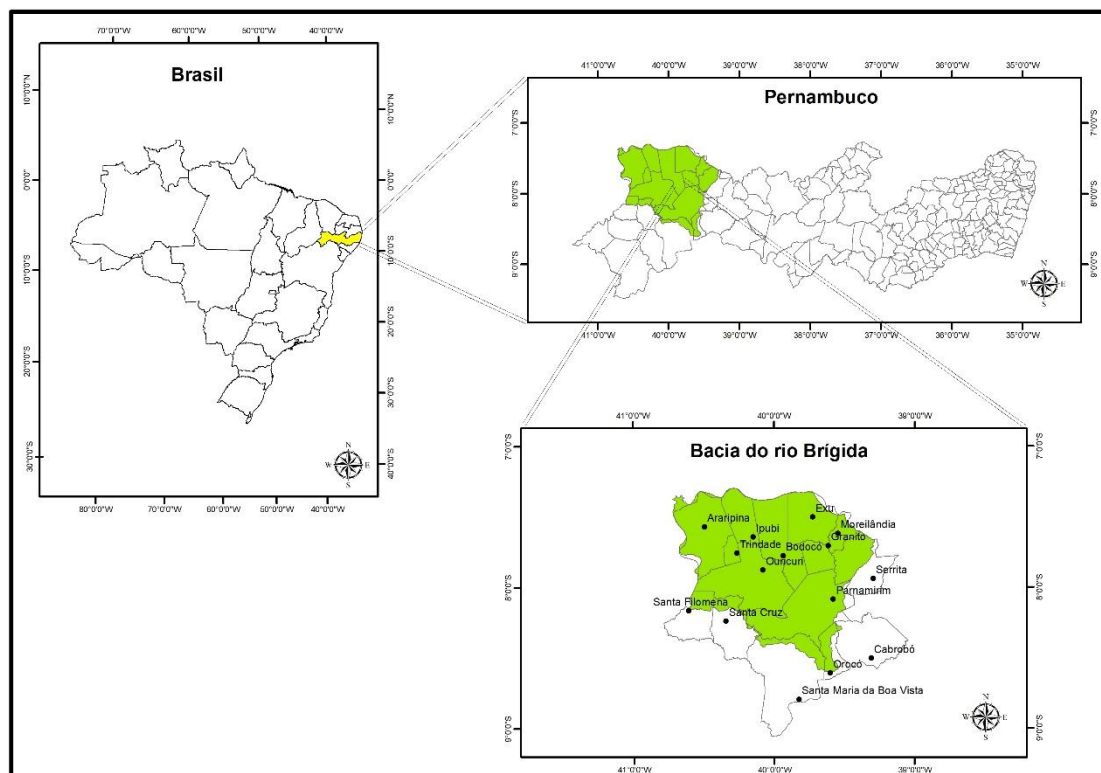
O território da bacia ocupa uma área de 13.560,90 km², o equivalente a 13,8% da área do Estado e abrange o limite de 15 (quinze) municípios, dos quais 08 (oito) tem sua sede inserida na bacia, o que representa uma população total de 313.631 habitantes, de acordo com a contagem do Censo Demográfico (IBGE, 2010), como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Municípios localizados na bacia do rio Brígida – PE.

Municípios	Sede localizada na Bacia	Área do município			População Total (hab.) *
		Total (km²) *	Pertencente a UP		
			(km)² *	(%) **	
Araripina	Sim	2.037,39	2.037,39	100	77.302
Bodocó	Sim	1.621,78	1.621,78	100	35.158
Cabrobó	Não	1.657,71	1,66	0,1	31
Exú	Sim	1.336,79	1.149,64	86	27.207
Granito	Sim	521,69	521,69	100	6.855
Ipubi	Sim	693,92	693,92	100	23.120
Moreilândia	Não	404,29	239,74	59,3	6.601
Orocó	Não	554,76	341,18	61,5	8.106
Ouricuri	Sim	2.381,58	2.381,58	100	64.358
Parnamirim	Sim	2.621,43	2.445,80	93,3	18.869
Santa Cruz	Não	1.245,98	198,11	15,9	2.161
Santa Filomena	Não	1.005,34	172,92	17,2	2.300
Santa Maria da Boa Vista	Não	3.000,74	489,12	16,3	6.428
Serrita	Não	1.538,50	756,94	49,2	9.019
Trindade	Sim	295,77	295,77	100	26.116

Fonte: * IBGE (2010); ** SECTMA (1998).

Figura 1 – Localização da bacia do rio Brígida.



Fonte: A Autora (2020).

3.1 HIDROGRAFIA

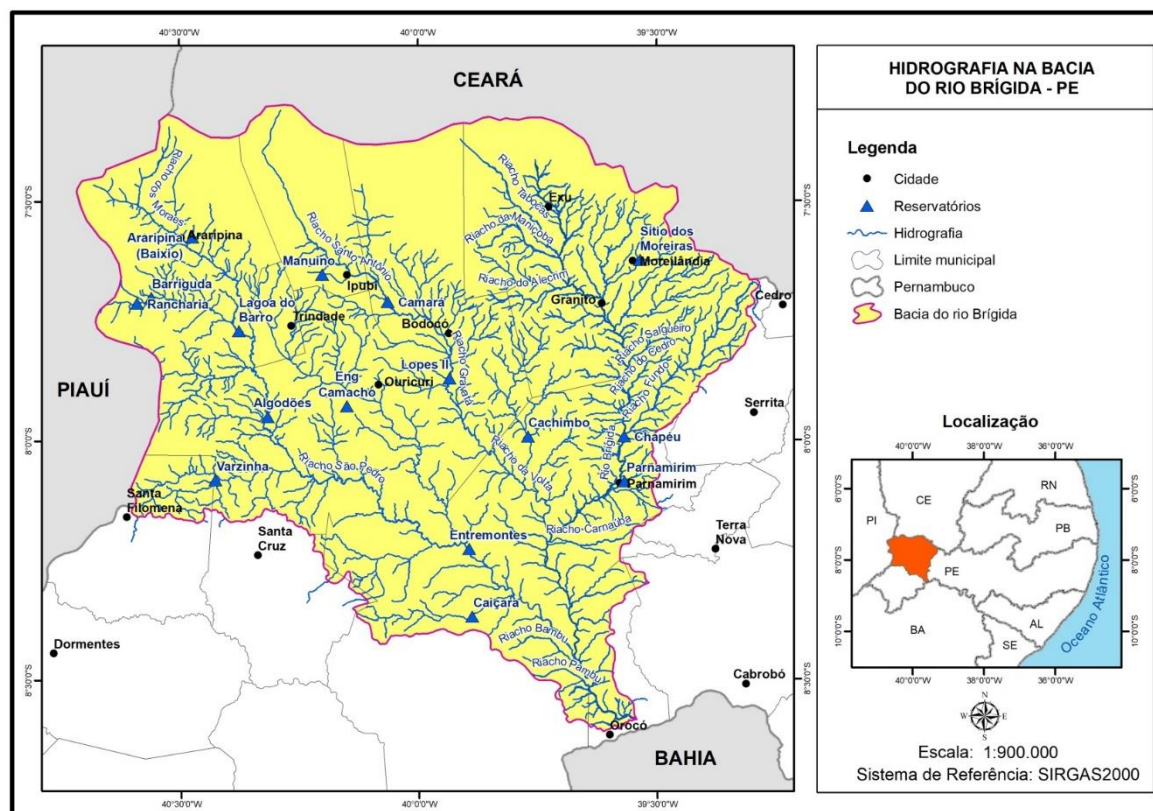
De acordo com SECTMA (2006), o rio Brígida nasce ao norte da localidade Gameleira, no município de Exú, na Chapada do Araripe a uma altitude aproximada de 800 m. O rio possui uma extensão aproximada de 193 km, que percorre o território de 15 municípios até desaguar no rio São Francisco.

A bacia do rio Brígida é uma sub-bacia do rio São Francisco, que está situada no trecho do Submédio São Francisco.

Os principais afluentes do rio Brígida pela margem direita são os riachos das Tabocas, Alecrim, Gravatá e rio São Pedro, enquanto que os afluentes da margem esquerda são os riachos do Fundo, Salgueiro e Cedro, como pode ser observado na Figura 2.

Os tributários mais importantes do rio Brígida são o rio São Pedro com uma extensão de 160 km, e o riacho Gravatá com aproximadamente 102 km de extensão. Todos os cursos d'água na bacia apresentam regime de escoamento intermitente e padrão de drenagem dendrítico (SECTMA, 1998).

Figura 2 – Hidrografia na bacia do rio Brígida.



Fonte: Adaptado de SECTMA (2006).

Com relação às características morfométricas, a bacia do rio Brígida possui uma elevação média de 558 m, fator de forma ($K_f = 0,37$) baixo, o que sugere que a bacia está menos sujeita a ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como enchentes; e fator de compacidade ($K_c = 2,226$) elevado, o que indica uma bacia de forma irregular, pouco propensa a enxurradas, segundo Villela e Mattos (1975).

Segundo os dados da Agência Nacional de Águas (ANA, 2020), a bacia do rio Brígida possui 18 (dezoito) reservatórios instalados em seu território, todos com capacidade de acumulação máxima superior a 1 milhão de m³, dentre os quais 05 (28%) se encontram em situação de colapso devido à estiagem prolongada da região, e 03 (17%) estão com volume inferior a 20% de sua capacidade máxima de acumulação, como pode ser observado na Tabela 2.

Tal situação ratifica a necessidade de monitoramento contínuo na região acerca de eventos hidrológicos extremos, sobretudo para a proposição de medidas de gestão de recursos hídricos que visem atenuar os problemas de escassez em longo prazo minimizando assim a dificuldade de abastecimento d'água das comunidades ali inseridas.

Tabela 2 – Principais corpos de acumulação da bacia do rio Brígida e seus respectivos volumes atuais.

Item	Açude	Município	Curso d'água	Capacidade máxima (m³)	Volume (m³) *	% Atual	Data	Situação
1	Entremontes	Parnamirim	Riacho São Pedro (Jacaré)	393.330.700	6.360.000	1,87	13/01/2020	Colapso
2	Chapéu	Parnamirim	Rio Brígida	188.000.000	18.960.000	10,09	10/01/2020	< 20%
3	Algodões	Ouricuri	Riacho São Pedro	58.481.874	s/i	s/i	-	-
4	Cachimbo	Parnamirim	Rios Logradouro, Garça e Boa Vista	31.207.006	1.410.000	4,52	01/01/2020	Colapso
5	Engenho Camacho	Ouricuri	Riachos do Bode e Padreco	27.664.500	2.760.000	9,97	13/01/2020	< 20%
6	Lopes II	Bodocó	Riacho Gravatá	23.935.360	13.630.000	56,93	13/01/2020	40 a 60%
7	Lagoa Barro	do Araripina	Riacho São Pedro	22.947.850	1.650.000	7,19	13/01/2020	< 20%
8	Caiçara	Parnamirim	Riachos Pau Ferrado e Lagoinha	10.500.000	0	0,00	12/01/2020	Colapso
9	Lagoa Pedra	da Santa Maria da Boa Vista	Rio Pau Ferrado	1.400.000	s/i	s/i	-	-
10	Parnamirim	Parnamirim	Rio Parnamirim	3.734.709	180.000	3,15	13/01/2020	Colapso
11	Araripina (Baixio)	Araripina	Riacho Sohen	3.702.230	0	0,00	13/01/2020	Colapso
12	Manuino (Ipubi)	Ipubi	-	1.984.117	s/i	s/i	-	-
13	Barrinha	Cedro	Riacho Barrinha	1.959.976	1.240.000	63,27	08/01/2020	60 a 80%
14	Barriguda	Araripina	Riacho Bom Jardim	1.618.241	380.000	23,46	13/01/2020	20 a 40%
15	Varzinha	Ouricuri	Riacho do Peixe	1.127.160	s/i	s/i	-	-
16	Rancharia	Araripina	Riacho Bom Jardim	1.042.810	s/i	s/i	-	-
17	Sítio Moreiras	dos Moreilândia	Rio Brígida	2.096.964	s/i	s/i	-	-
18	Camará	Bodocó	Riacho Santo Antônio	5.300.000	s/i	s/i	-	-

Fonte: SRHE (2017); * ANA (2020).

Além do monitoramento quantitativo dos reservatórios, a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2017) efetua o monitoramento qualitativo (Tabela 3), a partir da realização de coletas de análises físico-químicas e bacteriológicas em 05 (cinco) estações localizadas nos açudes situados na bacia do rio Brígida, os quais apresentaram de modo geral, resultados de Índice de Qualidade da Água (IQA) variando de regular a ruim, o que sugere que as águas dos mananciais da região estão com a potabilidade da água comprometida para consumo humano de acordo com a Portaria do Ministério da Saúde 2914/2011.

Tabela 3 – Resultados do monitoramento de qualidade das águas dos reservatórios da bacia do rio Brígida.

Açude	IQA *	IET	IET (Classe)	TTA	Risco de salinização	Data da Coleta	Volume (%) na coleta
Cachimbo	35	72	Hipereutrófico	Não-tóxico	Alto	18/10/2016	0,48
Lopes II	39	64	Supereutrófico	Não-tóxico	Médio	18/10/2016	3,3
Algodões	34	78	Hipereutrófico	Tóxico	Muito Alto	18/10/2016	1,26
Lagoa do Barro	-	83	Hipereutrófico	Tóxico	Muito Alto	18/10/2016	0,05
Entremontes	48	63	Eutrófico	Não-tóxico	Alto	14/12/2016	1,4

Fonte: APAC (2017).

* Ótimo ($100 \geq IQA > 79$), Boa ($79 \geq IQA > 51$), Regular ($51 \geq IQA > 36$), Ruim ($36 \geq IQA > 19$) e Péssimo ($IQA \leq 19$).

O Índice de Estado Trófico (IET) indica que boa parte dos açudes estão classificados em sua pior categoria, ou seja, como hipereutróficos, o que significa que os corpos d'água encontram-se afetados significativamente pelas elevadas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, com comprometimento acentuado nos seus usos, associado a episódios de florações de algas ou mortandade de peixes, com consequências indesejáveis para os múltiplos usos, inclusive sobre as atividades pecuárias nas regiões ribeirinhas (CPRH, 2017).

Outro fator que deve ser levado em consideração é o risco de salinização das águas dos mananciais devido à elevada taxa de insolação associada à irregularidade das chuvas e alta evaporação, o que exige medidas relacionadas à proteção e conservação da cobertura vegetal no entorno dos reservatórios e dos corpos d'água da bacia, minimizando assim esses efeitos.

Os resultados de qualidade da água são extremamente preocupantes, pois a região dispõe de baixa disponibilidade hídrica e se não houver investimentos

relacionados à infraestrutura básica, principalmente, de saneamento, haverá o comprometimento qualitativo dos recursos hídricos ali inseridos, afetando o abastecimento da região a médio e longo prazo, agravando ainda mais a problemática hídrica na bacia do rio Brígida.

3.2 CLIMATOLOGIA

No Nordeste brasileiro, o clima é influenciado pela presença da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), de baixa pressão atmosférica, originada pela convergência dos ventos alísios dos dois hemisférios e a decorrente formação de massa de nuvens que resulta em precipitações (CEPED-UFSC, 2013).

De acordo com Cirilo *et al.* (2007), a ZCIT é o principal sistema de produção de chuvas na região semiárida e atua proporcionando período chuvoso de dezembro a março na mesorregião do Sertão Pernambucano e de fevereiro a julho na mesorregião do Agreste Pernambucano.

A influência de várias massas de ar, muitas vezes transporta a umidade para outras regiões antes mesmo de se precipitarem na forma de chuva, isso faz com que a precipitação no Nordeste seja mal distribuída ao longo do ano e em baixa quantidade.

O clima da bacia do rio Brígida é do tipo BSh de Köppen, clima semiárido quente, que se caracteriza pela escassez de chuvas e irregularidade na distribuição da precipitação, associada a baixa nebulosidade, forte insolação, elevada taxa de evaporação que contribuem significativamente para risco de salinização dos corpos d'água. Apresenta temperatura média elevada, próximo de 27°C, com estação chuvosa irregular e torrencial de novembro a abril, com precipitação que varia de 250 a 750 mm anual (EMBRAPA, 2016).

Temperatura, ventos, umidade relativa e insolação, constituem, juntamente com as precipitações, os principais elementos e fatores condicionantes do clima de uma região. Segundo *World Meteorological Organization* (WMO, 1989) as caracterizações climáticas devem ser individualizadas com base nas Normais Climatológicas Padronizadas de 30 anos.

Sendo assim, para a caracterização climática da bacia hidrográfica do rio Brígida foi considerada as Normais Climatológicas, no período de 1961 a 1990 (Tabela 4), registradas na estação meteorológica 82886 de Cabrobó (INMET, 2009),

localizada no município homônimo, na latitude 08°31'S e longitude 39° 20'W a uma altitude de 341,5 m.

Segundo as Normais Climatológicas de 1961-1990, na região da bacia do rio Brígida, a direção dominante dos ventos é a SE, com intensidade mínima variável de 2,21 m/s nos meses de fevereiro a março e, máxima, de 3,78 m/s em setembro, registrando uma média anual de 2,95 m/s.

Tabela 4 – Variáveis meteorológicas da Estação 82886 de Cabrobó, segundo as Normais Climatológicas de 1961-1990.

Mês	Direção do Vento	Velocidade do Vento (m/s)	Insolação (horas)	Precipitação		Temperatura do Ar (°C)			UR (%)	Evaporação Total (mm)
				Número de dias	Lâmina (mm)	Média	Mínima	Máxima		
JAN	SE	2,5	241,4	6	87,2	27	22,4	32,8	57	261,1
FEV	SE	2,21	204,5	6	85,8	26,5	22,2	32	61	221,6
MAR	SE	2,21	207,2	9	136,1	26,4	22	31,9	67	200,8
ABR	SE	2,43	199,9	7	104,6	25,6	21,7	31	67	168,8
MAI	SE	2,68	200,1	4	40,4	24,8	20,8	29,9	67	187,3
JUN	SE	3,07	192,1	4	19,4	24	19,8	29,1	66	204,5
JUL	SE	3,62	196,7	4	13,5	23,7	19,1	29,1	65	246,3
AGO	SE	3,7	226,6	1	3,8	24,5	19,4	30,2	59	306,1
SET	SE	3,78	244,6	1	4,1	26	20,7	32	53	341,2
OUT	SE	3,22	270,5	1	10,5	27,9	22,1	34	48	368,8
NOV	SE	3,26	269,7	3	38,8	28,4	22,8	34,1	49	347,1
DEZ	SE	2,69	247,1	4	55,4	27,7	22,7	33,7	54	303,7
ANO	SE	2,95	2.700,4	50	599,5	26	21,3	31,7	59,4	3.157,3

Fonte: INMET (2009).

Legenda: UR = Umidade Relativa do Ar.

A insolação na região oscilou entre o mínimo de 192,1 horas em junho e, máximo de 270,5 horas em outubro, com total anual de 2.700 horas.

O número de dias de chuva da região é extremamente baixo, alcançando apenas 50 dias no ano. Os registros das precipitações do período de 1961-1990 oscilam entre mínimo de 3,8 mm, no mês de agosto, ao máximo de 136,1 mm em março, com um total anual de 599,5 mm.

As temperaturas média, mínima e máxima na estação de Cabrobó apresentam uma média anual de 26°C; 21,3°C e 31,7°C, respectivamente.

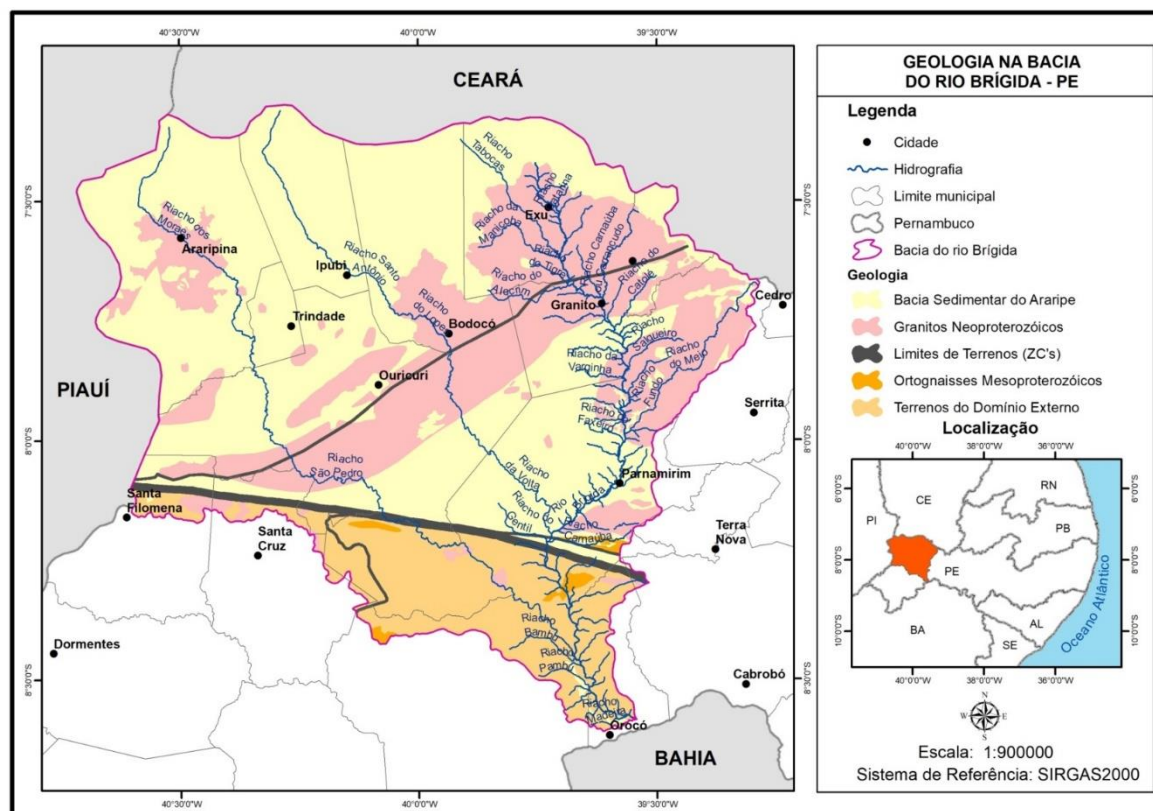
A umidade relativa do ar (UR) no período de 1961-1990 varia no mínimo de 48% no mês de outubro, e máximo de 67% no período de março a maio.

A evaporação total oscila entre o mínimo de 168,8 mm no mês de abril e o máximo de 368,8 mm no mês de outubro, alcançando uma evaporação anual de 3.157,3 mm.

3.3 GEOLOGIA

De acordo com a classificação de SECTMA (2006), a bacia do rio Brígida apresenta 04 (quatro) unidades geológicas: ❶ Bacia Sedimentar do Araripe, ❷ Granitos Neoproterozóicos, ❸ Ortognaisses Mesoproterozóicos e ❹ Terrenos do Domínio Externo, conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Geologia na bacia do rio Brígida.



Fonte: Adaptado de SECTMA (2006).

A Bacia Sedimentar do Araripe está instalada na Província Borborema, dentro da área de domínio dos Terrenos Granjeiro/Oricuri e Piancó-Alto Brígida e corresponde a uma bacia sedimentar de evolução policíclica, cujo arcabouço estratigráfico podem ser observadas quatro sequências tectono-sedimentares limitadas por discordâncias regionais ou por hiatos paleontologicamente definidos: a Sequência Gama, do Siluro-Devoniano; a Sequência Pré-Rifte, do Neojurássico; a Sequência Rifte, do Cretáceo (Neocomiano) e a Sequência Pós-Rifte, do Cretáceo (Aptiano-albiano). Estruturalmente, o segmento mesozóico da bacia sedimentar do Araripe é formado por dois compartimentos estruturais superpostos: o compartimento inferior corresponde às bacias do tipo rifte, encravadas em

depressões estruturais do embasamento pré-cambriano, originadas do tectonismo Eo-Cretácico; e o compartimento superior, corresponde à cobertura tabular meso-cretácica que recobre aquelas bacias rifte, segundo Dantas e Lima Filho (2006). Unidade geológica dominante na região da bacia do rio Brígida perfaz aproximadamente 53,7% de seu território.

Os Granitos Neoproterozóicos representam um resultado de uma atividade magmática que ocorreu entre 500 e 590 milhões de anos, intervalo atribuído à idade Brasileira (SECTMA, 2006). Ocupa aproximadamente 32,6% do território da bacia do rio Brígida.

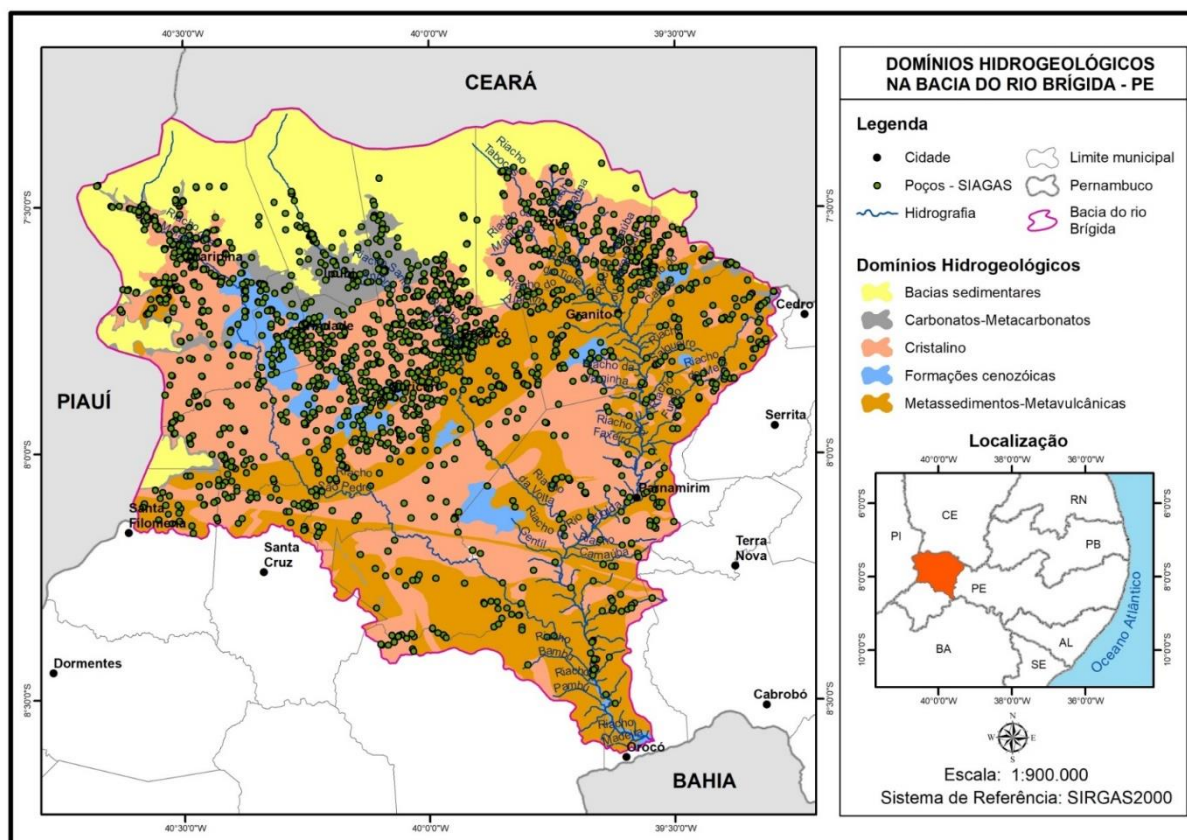
Os Ortognaisses Mesoproterozóicos são caracterizados de forma geral, por sequências metassedimentares muitas vezes migmatitizadas cortadas por ortognaisses graníticos, e a idade variando de Paleoproterozóico. Todos estes terrenos que na atualidade aparecem juntos constituíram fragmentos de continentes amalgamados por tectônica de placas e que configuram a Província Borborema (SECTMA, 2006). Essa unidade geológica ocupa apenas 0,6% do terreno da bacia do rio Brígida.

Os Terrenos do Domínio Externo, localizado entre os Lineamentos Patos e Pernambuco, onde ao Norte foram reconhecidos os Terrenos Granjeiro-Ouricuri (TGJ), que tem como limite tectônico, ao norte, a Bacia Sedimentar do Araripe, e a Leste e ao Sul, o Terreno Piancó/Alto Brígida, onde estão presentes unidades do Arqueano, do Neoproterozóico/Cambriano e coberturas cenozoicas (SECTMA, 1998). Essa unidade geológica perfaz 13,1% do território da bacia do rio Brígida.

3.4 HIDROGEOLOGIA

Conforme os dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2014), o território da bacia do rio Brígida está inserido em 05 (cinco) domínios hidrogeológicos, são eles: ❶ Bacias Sedimentares, ❷ Carbonatos-Metacarbonatos, ❸ Cristalino, ❹ Formações Cenozoicas e ❺ Metassedimentos-Metavulcânicas, conforme pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Domínios hidrogeológicos na bacia do rio Brígida.



Fonte: Adaptado de CPRM (2014).

O domínio das Bacias Sedimentares perfaz 21,2% do território da bacia do rio Brígida, engloba as sequências de rochas sedimentares que compõem as entidades geotectônicas homônimas Bacias Sedimentares, com boa capacidade de armazenamento de água subterrânea por conta da presença de espessura elevada de sedimentos e de alta porosidade / permeabilidade de sua litologia, a qual favorece poços com vazão considerável de exploração (CPRM, 2014).

No domínio dos Carbonatos-Metacarbonatos predominam rochas calcárias, calcárias magnesianas e dolomíticas, que tem como característica principal, a constante presença de formas de dissolução cárstica.

A presença de fraturas e superfícies de descontinuidade nesse aquífero propicia uma permeabilidade/porosidade secundária, a qual favorece acumulação de água subterrânea em reservatórios localizados e descontínuos que comumente não são utilizados para a exploração, pois a água possui dureza bastante elevada por causa da presença de carbonatos (CPRM, 2014). Esse domínio ocupa 4,5% do terreno da bacia do rio Brígida.

No domínio Cristalino, o aquífero do tipo fissural é composto por granitóides, gnaisses, granulitos e migmatitos, os quais não possuem porosidade e consequentemente, não favorece a ocorrência de água subterrânea de modo contínuo, propiciando apenas exploração de poços com vazão pequena e geralmente salinizada (SECTMA, 1998). Esse domínio ocupa aproximadamente 38,2% do território da bacia do rio Brígida.

O domínio das Formações Cenozoicas é formado por pacotes de rochas sedimentares de naturezas e espessuras diversas, as quais a depender da razão areia/argila podem propiciar captação com vazões significativas (CPRM, 2014). Ocupa apenas 4,2% do território da bacia do rio Brígida.

O domínio dos Metassedimentos-Metavulcânicas, reúne xistos, filitos, metarenitos, metassiltitos, anfíbolitos, quartzitos, ardósias, metagrauvacas e metavulcânicas diversas. Esse domínio não dispõe de porosidade, devido à ocorrência de rochas com comportamento reológico distinto, que dependem exclusivamente dos esforços causadores das fendas e fraturas para o acúmulo de água subterrânea (SECTMA, 1998). Esse domínio ocorre em 31,9% do território da bacia do rio Brígida.

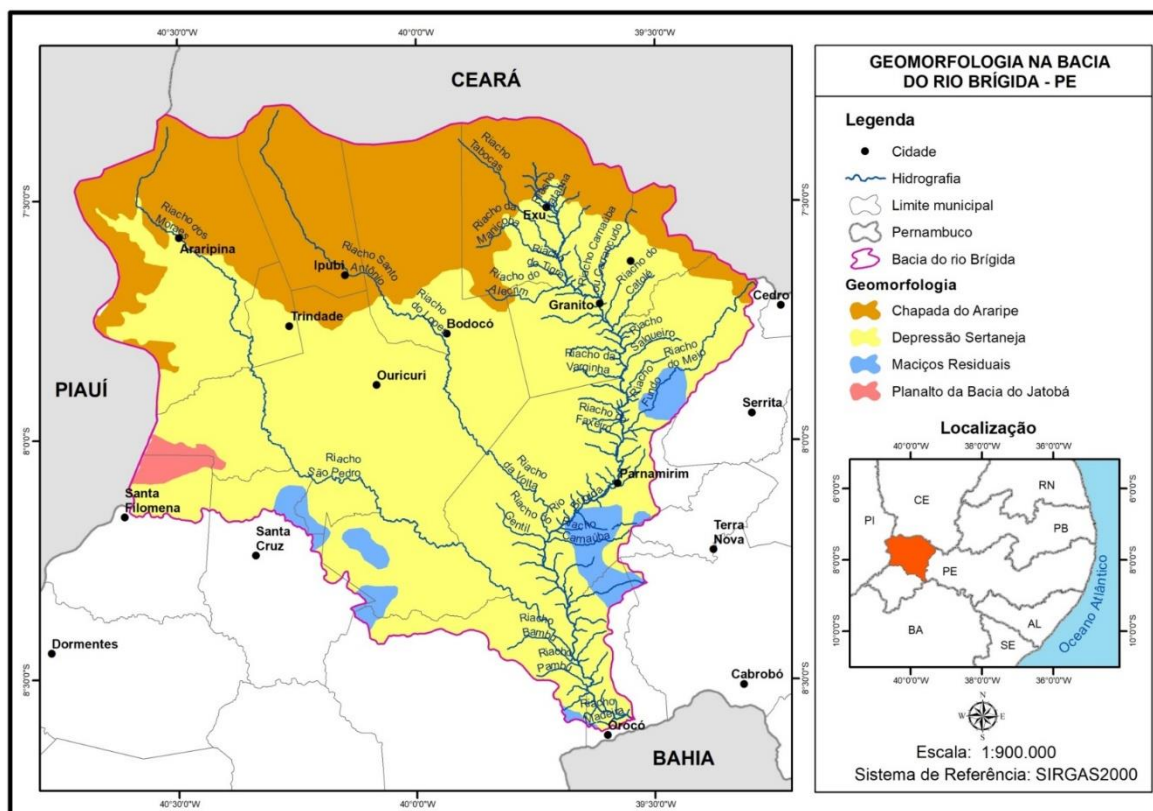
Conforme o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS (CPRM, 2017a), os municípios que perfazem o território da bacia do rio Brígida possuem 2.053 poços cadastrados, cuja água captada é utilizada para abastecimento (10,5%), indústria (0,5%), irrigação (3,3%), fins múltiplos (25,4%), pecuária (5,2%) e outros usos não informados (54,9%).

A utilização de poços artesianos é um meio alternativo para o abastecimento dos municípios da bacia do rio Brígida, sobretudo, em períodos prolongados de estiagem, quando ocorre o colapso dos principais mananciais de acumulação.

3.5 GEOMORFOLOGIA E HIPSOMETRIA

Segundo SECTMA (2006), na bacia do rio Brígida há ocorrência de 04 (quatro) unidades geomorfológicas: ❶ Chapada do Araripe, ❷ Depressão Sertaneja, ❸ Maciços Residuais, e ❹ Planalto da Bacia do Jatobá, conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Geomorfologia na bacia do rio Brígida.

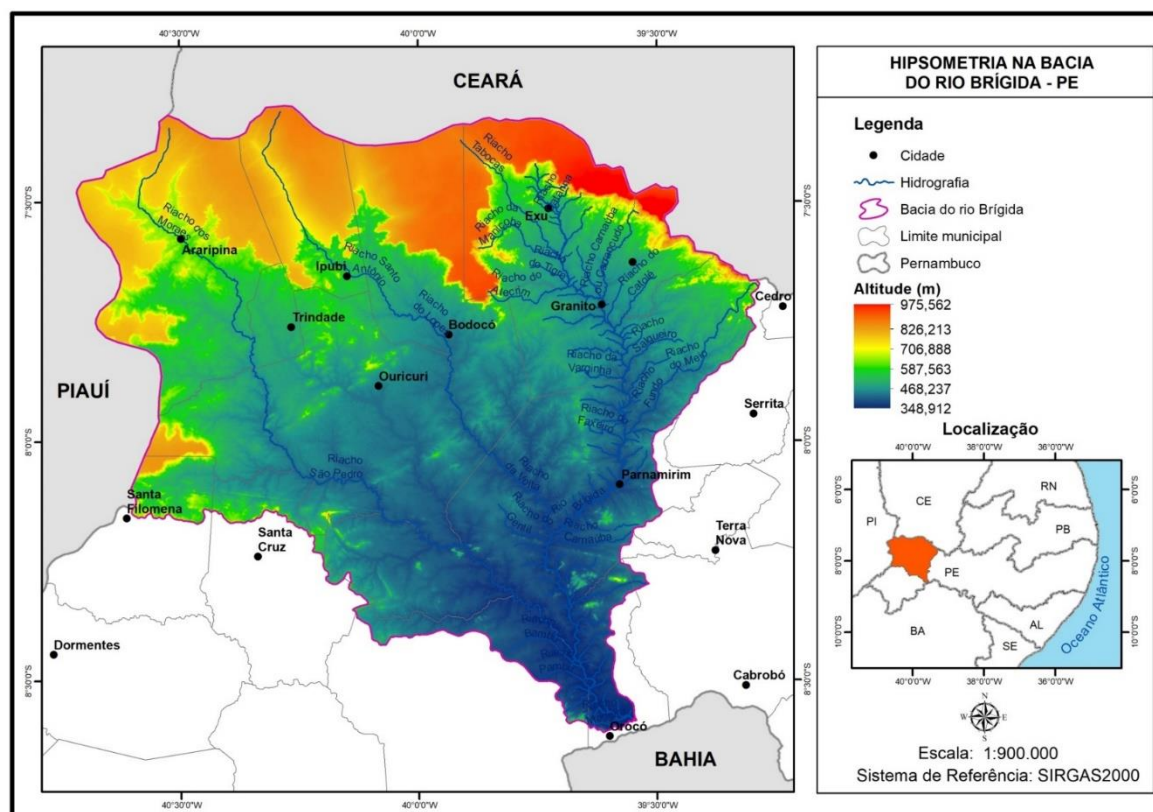


Fonte: Adaptado de SECTMA (2006).

A hipsometria contendo as variações de altimetria na região da bacia do rio Brígida obtida mediante o Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA, 2011), com resolução espacial de 30 m, pode ser observada na Figura 6.

A Chapada do Araripe é um amplo relevo tabular, desenvolvido nos terrenos fanerozoicos da bacia homônima, situado entre os estados de Pernambuco e Ceará. Apresenta um relevo de erosão plano e encostas erosivas escarpadas, de onde partem vários afluentes da margem esquerda do rio São Francisco (SECTMA, 1998). Ocupam 29,7% do terreno da bacia do rio Brígida em altitudes compreendidas entre 600 e 975 m.

Figura 6 – Hipsometria na bacia do rio Brígida.



Fonte: A Autora (2020).

Nessa Chapada encontra-se uma das três maiores reservas de gipsita do país, denominada de Pólo Gesseiro do Araripe, cujos municípios de Ipubi, Araripina, Ouricuri, Trindade e Bodocó reunidos concentram aproximadamente 36% das reservas de gipsita, que corresponde a uma produção de cerca de 95% do gesso consumido no Brasil (CPRM, 2017b).

A Depressão Sertaneja é uma ampla superfície pediplanada, de idade plio-pleistocênica, na qual emergem numerosos inselbergues, cristas residuais, pedimentos e maciços residuais (SECTMA, 2006), situados no Planalto da Borborema em altitudes que oscilam entre 400 e 500 m e perfazem 65,2% do território da bacia do rio Brígida.

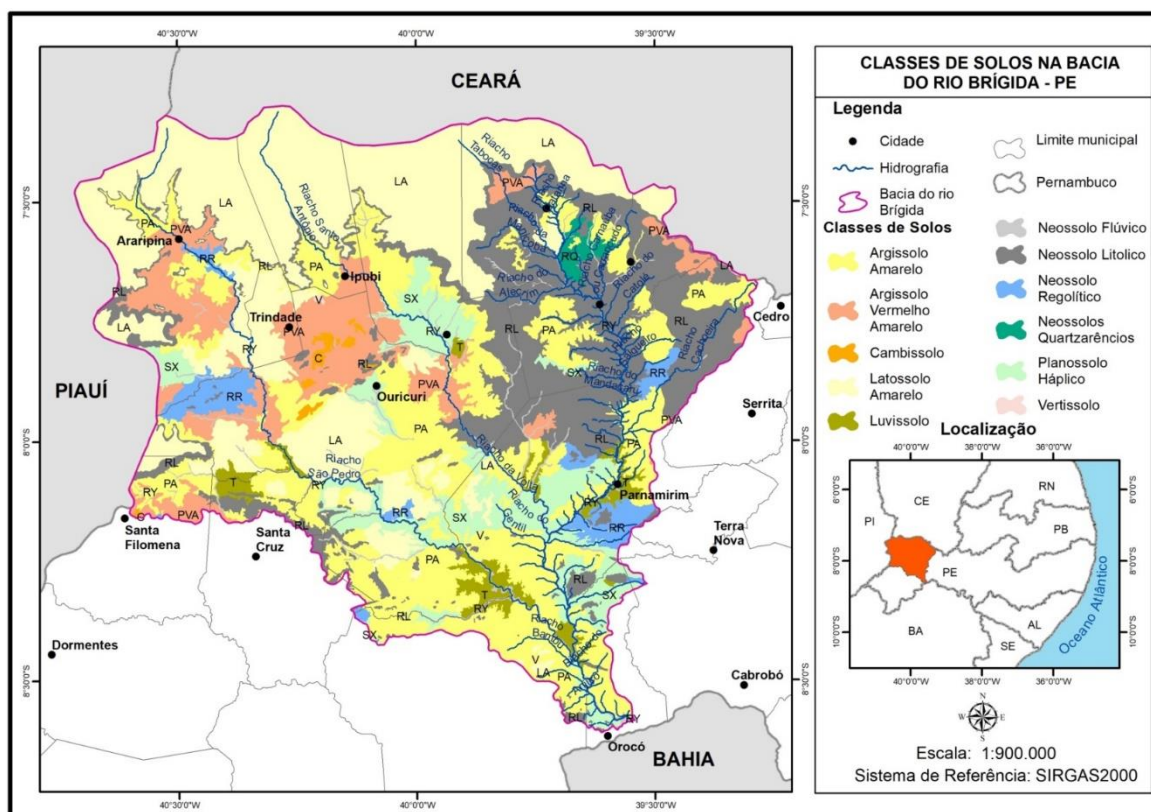
Os Maciços Residuais são corpos intrusivos isolados delimitados por encostas íngremes sob a influência, sobretudo do intemperismo físico (Silva, 2007). Ocupam somente 3,9% do terreno da bacia do rio Brígida em cotas inferiores a 400 m de altitude.

O Planalto da Bacia do Jatobá é um dos “ressaltos cuestiformes” ou superfícies tabulares desenvolvidas em coberturas fanerozoicas no interior do Estado de Pernambuco, cujo relevo foi truncado por uma superfície de erosão. Estende-se desde o rio São Francisco até as proximidades da cidade de Arcoverde, coincidindo, assim, com a unidade estrutural denominada Bacia do Jatobá (SECTMA, 1998). Na região da bacia do rio Brígida ocupa apenas 1,2% do território em cotas compreendidas entre 500 e 600 m de altitude.

3.6 PEDOLOGIA

Segundo SECTMA (2006) e classificação de EMBRAPA (2010), no território da bacia do rio Brígida há a ocorrência de 07 (sete) classes de solos: ❶ Argissolos, ❷ Cambissolos, ❸ Latossolos, ❹ Luvisolos, ❺ Neossolos, ❻ Planossolos e ❼ Vertissolos, através das quais foram identificadas as 11 (onze) unidades descritas abaixo, como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Classes de solos na bacia do rio Brígida.



Fonte: Adaptado de SECTMA (2006).

1) Argissolo Amarelo (PA) são solos desenvolvidos de rochas cristalinas que apresentam como característica principal um horizonte de acumulação de argila, B textural (Bt), tipicamente de coloração amarelada.

Apresenta textura variando de arenosa a argilosa com granulometria média, com o horizonte superficial A do tipo moderado e proeminente. Ocupa 24,8% do território da bacia do rio Brígida.

2) Argissolo Vermelho Amarelo (PVA) são solos minerais, não hidromórficos, com acúmulo de argila, predominantemente, de atividade baixa, em subsuperfície no horizonte B textural. Desenvolvem-se a partir dos mais diversos materiais de origem e abrangem características morfológicas, físicas e químicas muito diversificadas. Variam desde solos rasos a muito profundos e perfazem 9,5% do terreno da bacia do rio Brígida.

3) Cambissolos (C) são solos fortemente, até imperfeitamente, drenados, que variam de rasos a profundos, de cor bruno-amarelada, e de alta a baixa saturação por bases e atividade química da fração coloidal, que ocupam somente 0,4% do território da bacia do rio Brígida.

4) Latossolo Amarelo (LA) são solos desenvolvidos de rochas cristalinas, na porção que antecede o planalto da Borborema. Esses solos possuem cor, textura e estrutura uniformes, variam de profundos a muito profundos, bem drenados, com predominância de textura argilosa e muito argilosa. Na bacia do rio Brígida ocupam 28,6% do território.

5) Luvisolo (T) são solos rasos a pouco profundos, com horizonte B textural, de cores vivas e argila de alta atividade, apresentando horizonte A fraco, de cor clara, pouco espesso, maciço ou com estrutura fracamente desenvolvida que abrange somente 2,3% do território da bacia.

6) Neossolo Flúvico (RY) são solos minerais não hidromórficos, oriundos de sedimentos recentes do período Quaternário que são formados pela sobreposição de camadas de sedimentos aluviais recentes, que constituem 2,8% do território da bacia do rio Brígida.

7) Neossolo Litólico (RL) são solos muito pouco desenvolvidos, rasos, não hidromórficos, apresentando horizonte A diretamente sobre a rocha ou horizonte C de pequena espessura, que perfazem 20,1% do território da área de estudo.

8) Neossolo Regolítico (RR) são solos pouco desenvolvidos, não hidromórficos e de textura normalmente arenosa, que apresentam alta erodibilidade, principalmente

em declives mais acentuados, e constituem apenas 3% do terreno da bacia do rio Brígida.

9) Neossolo Quartzarênico (RQ) são solos que ocorrem em relevo plano ou suave ondulado, apresentam textura arenosa ao longo do perfil e cor amarelada uniforme abaixo do horizonte A, que é ligeiramente escuro e representa 0,6% do terreno da bacia do rio Brígida.

10) Planossolo Háplico (SX) são solos que comumente ocorrem em terrenos de relevo plano a suave ondulado, pouco profundos, com horizonte superficial de cores claras e textura arenosa ou média, que perfazem 7,9% do território da região de estudo.

11) Vertissolo (V) são solos minerais com séria restrição temporária à percolação de água, geralmente com teor de argila superior a 30% ao longo do perfil, e que apresentam mudança significativa de volume de acordo com a variação do teor de umidade. Esse tipo de solo representa somente 0,1% do território da bacia do Brígida.

Capacidade de Campo do Solo

A partir da classificação de solo supracitada e dos valores da capacidade máxima de retenção de água em milímetros por classes de solos do Zoneamento Pedoclimático do Estado de Pernambuco (CONDEPE/SUDENE, 1987) foi possível extrair de forma ponderada, na área da bacia do rio Brígida, com o auxílio de software de geoprocessamento (ArcGIS), a capacidade de campo do solo (CC), utilizando os coeficientes da área de influência de cada posto pluviométrico retiradas do polígono de Thiessen. Esses valores (Tabela 5) foram empregados no balanço hídrico para estimativa do índice de severidade de seca de Palmer (PDSI), conforme descrito no item 4.4.3.

Tabela 5 – Capacidade de campo do solo (CC) obtida para a bacia do rio Brígida.

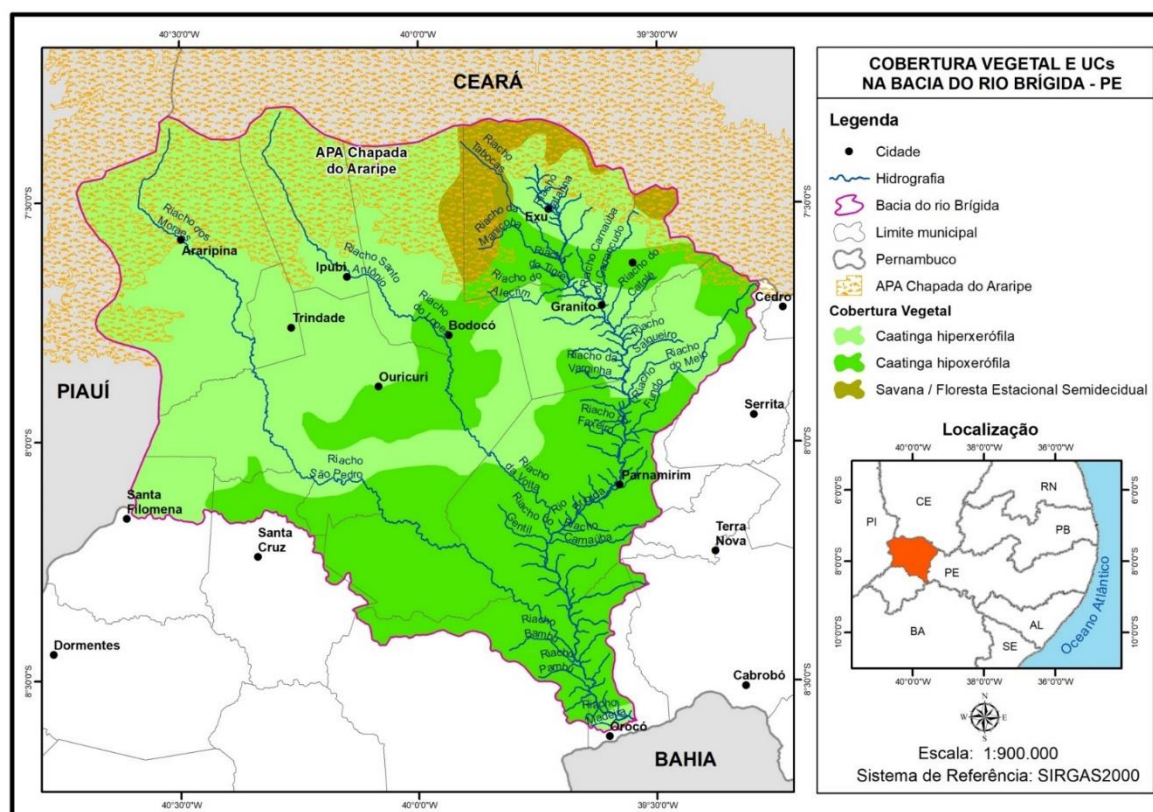
Posto Pluviométrico	CC Inferior (mm)	CC Superior (mm)	CC Total (mm)
739021	32,20	22,16	54,36
739025	28,75	21,02	49,77
739026	28,38	20,55	48,92
739028	25,95	19,48	45,43
739029	28,38	20,64	49,03
739030	36,05	22,89	58,94
739031	35,94	22,76	58,70
739032	26,66	20,43	47,09
739033	30,57	23,29	53,86
739034	25,02	19,34	44,36
740013	34,23	24,42	58,65
740015	47,86	24,49	72,35
740016	38,25	24,98	63,23
740017	32,02	24,40	56,42
740018	41,32	24,17	65,48
740020	36,20	23,89	60,08
740021	36,57	22,91	59,48
740023	32,31	24,67	56,99
740025	39,98	24,75	64,73
740029	39,55	24,57	64,12
839000	39,18	25,00	64,18
839001	41,59	24,48	66,07
839007	36,08	24,79	60,87
839008	33,83	22,77	56,60
839009	39,14	24,08	63,22
839011	33,50	22,23	55,73
839013	36,53	23,52	60,05
839014	34,61	22,82	57,43
839015	42,35	24,86	67,20
839023	39,30	23,99	63,28
839034	39,86	24,24	64,10
839047	31,05	21,88	52,93
840004	38,47	23,99	62,46
840011	35,38	24,21	59,59
840016	34,56	23,68	58,25
840019	30,94	21,14	52,08
840021	39,96	24,25	64,21
840024	36,61	23,94	60,55

Fonte: A Autora (2020).

3.7 COBERTURA VEGETAL

Segundo IBGE (2009), a bacia do rio Brígida está totalmente inserida no bioma Caatinga, endêmico do Brasil e extremamente ameaçado pelo processo de desertificação devido à ausência de manejo para exploração de madeira. Esse bioma está representado na região por 03 (três) fitofisionomias: ❶ Caatinga Hiperxerófila, ❷ Caatinga Hipoxerófila e ❸ Savana/Floresta Estacional Semidecidual, as quais podem ser observadas na Figura 8.

Figura 8 – Cobertura vegetal e Unidades de Conservação (UCs) na bacia do rio Brígida.



Fonte: A Autora (2020).

A Caatinga Hiperxerófila que perfaz 57,1% do território da bacia é composta por vegetação arbustiva, de pequeno porte, espaçada, de galhos retorcidos e também abundância de suculentas como cactáceas, que ocorre predominantemente em solos rasos que cobrem rochas do embasamento cristalino, tais como granitos, gnaisses, migmatitos, metaconglomerados, quartzitos, mármore, micaxistos, entre outros tipos, segundo Pimentel (2011).

A Caatinga Hipoxerófila que ocupa 38,5% do território da bacia do rio Brígida é formada por vegetação arbustivo-arbórea mais ou menos densa em áreas de solos

profundos que cobrem rochas de natureza sedimentar, localmente areníticas e calcárias da bacia sedimentar do Araripe (SECTMA, 1998).

A Savana/Floresta Estacional Semidecidual que abrange apenas 4,4% do território da bacia do rio Brígida é formada por uma mata de transição entre trecho de caatinga no sertão e de floresta úmida, representada por espécies arbóreas de alto porte com aproximadamente 20 m de altura, que no período seco apresentam característica semicaducifolia (EMBRAPA, 2012).

Importante ressaltar que apesar do endemismo do bioma local, existe apenas 01 (uma) unidade de conservação (UC) de uso sustentável na bacia, para a proteção dos recursos naturais, conforme prevê a Lei 9.985 de 2000, que é a Área de Proteção Ambiental (APA) Chapada do Araripe. Esse território vem sofrendo com os processos de desertificação da região, sobretudo, devido à retirada de madeira ilegal para fabricação de carvão e utilização no polo gesseiro do Araripe situado nas proximidades, segundo Araújo (2004) e Granja *et al.* (2017).

3.8 DESASTRES NATURAIS

Nas últimas décadas, os desastres naturais tem se tornado cada vez mais frequentes em diversos lugares do planeta, os quais têm intensificado a sua magnitude e consequentemente aumentado os níveis dos impactos gerados pela sua passagem.

Segundo UFSC (2012), desastres naturais são aqueles causados por processos ou fenômenos naturais que podem implicar em perdas humanas e/ou outros impactos, como, danos ao meio ambiente, à saúde, à propriedade, e provocam interrupção dos serviços e distúrbios sociais e econômicos.

Sendo assim, de acordo com a intensidade dos desastres naturais e conforme a proporção de danos humanos, materiais, ambientais, econômicos e sociais, o município pode solicitar reconhecimento de Situação de Emergência (SE) e/ou de Estado de Calamidade Pública (ECP) junto a Defesa Civil, a fim de receber auxílio do governo estadual e/ou federal para poder agir de forma imediata frente aos estragos, pessoas desalojadas ou desabrigadas.

Nesse contexto, é possível verificar que a bacia do rio Brígida se encontra em local vulnerável a ocorrência de desastres naturais, haja vista que mediante os registros da Defesa Civil (Brasil, 2020) e do CEPED-UFSC (2013), no período de 1991 a 2019, foram registrados 459 desastres naturais, dos quais, 413 (90%) são

estiagem e seca, 39 (8%) são enxurrada e 07 (2%) são inundação, como pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 – Registros de desastres naturais nos municípios que integram a bacia do rio Brígida no período de 1991-2019.

Municípios	Estiagem e Seca	Enxurrada	Inundação	Vendaval	Granizo	Movimento de Massa
Araripina	32	4	0	0	0	0
Bodocó	26	3	1	0	0	0
Cabrobó	29	4	1	0	0	0
Exú	26	4	0	0	0	0
Granito	24	2	0	0	0	0
Ipubi	25	2	0	0	0	0
Moreilândia	30	4	0	0	0	0
Orocó	29	2	1	0	0	0
Ouricuri	25	3	0	0	0	0
Parnamirim	28	1	1	0	0	0
Santa Cruz	32	2	0	0	0	0
Santa Filomena	28	2	0	0	0	0
Santa Maria da Boa Vista	27	2	1	0	0	0
Serrita	28	2	0	0	0	0
Trindade	24	2	2	0	0	0
Total	413	39	7	0	0	0

Fonte: CEPED-UFSC (2013); Brasil (2020).

A ocorrência de estiagem e seca por período de tempo prolongado na bacia ocasiona diversos transtornos à comunidade, dentre eles, o comprometimento do abastecimento de água, além de prejuízos à economia e a agropecuária, principal atividade econômica da região, o que ratifica a necessidade de estudos que possam subsidiar elementos a gestão desses eventos, a exemplo do trabalho ora proposto.

4 MATERIAL E MÉTODOS

No presente item serão abordados todos os métodos empregados para o desenvolvimento do trabalho, desde a etapa inicial de coleta de dados e consistência até os testes estatísticos vitais para a análise de resultados e discussões.

4.1 CONSISTÊNCIA DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS

A bacia hidrográfica do rio Brígida abrange o território de 15 (quinze) municípios, porém o Sistema de Informações Hidrológicas – Hidroweb (ANA, 2017) somente possui postos pluviométricos em 13 (treze) municípios. As cidades de Santa Cruz e Santa Filomena não possuem postos pluviométricos no limite de seus territórios.

Dessa forma, foram inicialmente listados 64 (sessenta e quatro) postos pluviométricos, contudo foram descartados 04 (quatro) postos antes do procedimento de preenchimento de falhas, pois 03 (três) postos apresentavam série de dados inferior a 01 (um) ano e 01 (um) posto possuía série com sete anos repletos de falhas, restando, portanto, 60 (sessenta) postos.

Após efetuar análise dessas séries pluviométricas, retiradas do acervo do Hidroweb, foram identificados os quantitativos de postos pluviométricos por município, o período de dados contínuos, o período de dados com falhas e o número de anos da série.

Inicialmente foi empregado o período de 1910 a 2016 para os dados pluviométricos, contudo, posteriormente a análise de disponibilidade dos dados climáticos (temperatura, evapotranspiração, etc.) e de sensoriamento remoto (imagens de satélite), optou-se por analisar a série no intervalo de 1961 a 2016.

Em seguida, foi utilizado um aplicativo desenvolvido por Azevedo (2017) para o preenchimento de falhas, onde se empregaram 05 (cinco) métodos estatísticos, ambos descritos por Azevedo (2010): ❶ Ponderação Regional com Regressão; ❷ Ponderação Regional; ❸ Regressão Linear Simples; ❹ Vetor regional; e ❺ Regressão Linear Múltipla. Contudo, apenas os 04 (quatro) primeiros métodos foram empregados para obtenção da média utilizada para o preenchimento, pois o método da regressão linear múltipla não se adequou corretamente aos postos da região estudada, sendo observados em alguns casos, resultados de pluviometria negativa e pluviometria superestimada que não condiz com a tendência da região.

Método da Ponderação Regional com Regressão

Segundo Azevedo (2010) esse método consiste em estabelecer regressões lineares entre o posto com dados a serem preenchidos (Y) e cada um dos postos vizinhos ($X_1, X_2, \dots, X_n$), onde a partir de cada uma das regressões lineares efetuadas obtêm-se o coeficiente de correlação (r), e estabelecem-se fatores de peso, um para cada posto usando a Equação 1.

$$W_{xj} = \frac{r_{yxj}}{(r_{yx1} + r_{yx2} + \dots + r_{yxn})} \quad (1)$$

Onde:

W_{xj} = fator de peso entre os postos

Y e X_j , r_{yxj} = coeficiente de correlação entre os postos citados

n = número total de postos vizinhos considerados

A soma de todos os fatores de peso deve ser a unidade, onde o valor a preencher no posto Y é obtido pela Equação 2.

$$Y_c = X_1 W_{x1} + X_2 W_{x2} + \dots + X_n W_{xn} \quad (2)$$

Método da Ponderação Regional

De acordo com Azevedo (2010), esse método consiste em selecionar um grupo de postos vizinhos situados em uma região climatológica semelhante utilizando ao mínimo três postos com uma série a partir de dez anos de dados, onde o posto Y que apresenta falhas terá sua série preenchida por meio da Equação 3.

$$Y_c = \frac{1}{3} \left[\frac{X_1}{X_{m1}} + \frac{X_2}{X_{m2}} + \frac{X_3}{X_{m3}} \right] \cdot Y_m \quad (3)$$

Onde:

Y_c = precipitação do posto Y a ser estimada

X_1, X_2 e X_3 = precipitações correspondentes ao mês (ou ano) que se deseja preencher, observadas nas três estações vizinhas.

Y_m = precipitação média no posto Y

X_{m1}, X_{m2} e X_{m3} = precipitações médias nas três estações circunvizinhas.

Método da Regressão Linear Simples

Conforme Azevedo (2010), nesse método, as precipitações do posto com falhas e de um posto vizinho são correlacionadas através dos valores da equação da função de um gráfico cartesiano ortogonal, onde são plotados os valores correspondentes aos dois postos envolvidos e traçada a reta que passa pelo ponto definido pelos valores médios dessas duas variáveis envolvidas, e que melhor se ajuste a nuvem de pontos. A função assume a equação $Y = A.X + B$, onde os coeficientes da reta podem ser obtidos diretamente no gráfico, em que o valor de B será o de Y quando $X = 0$, encontrando-se sobre o eixo das coordenadas, e o de A será a tangente do ângulo que a reta ajustada faz com a horizontal.

Método do Vetor Regional

Método que constitui uma alternativa para realizar as análises de consistência e preenchimento de dados pluviométricos em níveis mensal e anual. O vetor regional é definido como uma série histórica cronológica, sintética, de índices pluviométricos anuais ou mensais, oriundos da extração por um método de máxima verossimilhança da informação mais provável contida nos dados de um conjunto de estações de observação agrupadas regionalmente (Azevedo, 2010).

O método consiste na determinação de dois vetores (L e C), onde L é um vetor coluna com n linhas de observações, e C um vetor linha com m colunas, ou seja, m postos, cuja multiplicação resulta numa aproximação da matriz de precipitações (P). O vetor L contém índices que são únicos para toda a região e estão relacionados às alturas precipitadas em cada posto por meio dos coeficientes contidos no vetor C (ANA, 2012).

Análise de Consistência de Séries Pluviométricas

Logo após o processo de preenchimento de falhas por meio da utilização dos quatro métodos estatísticos supracitados foi realizada análise detalhada para verificar se o preenchimento de falhas foi efetivo, ou seja, se houve uma homogeneização dos dados de um determinado posto em relação às observações registradas nos postos vizinhos.

Para tanto, foi aplicado o método de análise da Curva de Dupla Massa, desenvolvido pelo *United States Geological Survey – USGS* (Searcy e Hardison, 1960) que se baseia na observação do desvio da reta com ângulo de 90° , para

indicação de mudança de tendência, ou de presença de erros nos dados pluviométricos em uma dada série histórica.

O método consiste em plotar em um gráfico cartesiano, curva duplo acumulativa, relacionando os totais anuais (ou mensais) acumulados do posto que se deseja consistir os dados, no eixo das ordenadas, e as médias acumuladas dos totais anuais (ou mensais) de todos os postos da região, no eixo das abscissas (Tucci, 2013). Se os valores do posto a consistir são proporcionais aos observados na base de comparação, os pontos devem se alinhar segundo uma única reta com ângulo de 90°, caso contrário, a mudança de declividade ou tendência sugere a presença de erros sistemáticos, assim como, erros de transcrição ou postos sujeitos a diferentes regimes pluviométricos.

Polígono de Thiessen

Logo após o processo de preenchimento de falhas e consistência da série foi estimada a precipitação média da bacia obtida por meio da delimitação dos polígonos de Thiessen que foi realizada com base na metodologia de Pinto *et al.* (1976), a qual consiste em dar pesos aos totais precipitados em cada posto pluviométrico (P_i), de modo proporcional a sua área de influência (A_i), conforme demonstrado na Equação 4.

$$h_m = \sum_{i=1}^n P_i A_i / \sum_{i=1}^n A_i \quad (4)$$

A Figura 9 ilustra de forma resumida como foi efetuada a sequência de procedimento de consistência dos dados pluviométricos no presente estudo.

Figura 9 – Sequência do procedimento de consistência dos dados pluviométricos.



Fonte: A Autora, 2020.

4.2 TENDÊNCIA TEMPORAL

Após as etapas de análise, preenchimento e homogeneização dos dados procedeu-se a etapa de verificação de mudança de tendência em escala temporal na série pluviométrica, dos índices de seca, aridez e de vegetação por meio da aplicação de diversos testes estatísticos paramétricos e não-paramétricos.

Os testes paramétricos assumem que os dados da série temporal e os erros (desvios da tendência) seguem uma distribuição específica (geralmente distribuição normal), enquanto que os testes não-paramétricos são livres de distribuição.

Sendo assim, os testes paramétricos são extremamente úteis, pois conseguem identificar a mudança de comportamento na série de dados a partir da magnitude da mudança na média ou gradiente de tendência; ao passo que os testes não-paramétricos detectam a tendência, mas não conseguem quantificar o tamanho da tendência, contudo, como séries hidrológicas geralmente não seguem uma distribuição normal ele pode ser aplicado para identificar tais mudanças.

No presente estudo foram aplicados os testes não-paramétricos de Mann-Kendall, Spearman's Rho, Cusum, Rank-Sum; e os testes paramétricos de Linear Regression, Cumulative Deviation, Worsley likelihood e Student's, cuja definição é apresentada a seguir com base nos conceitos descritos por Chiew *et al.* (2017).

Importante frisar que todos os testes paramétricos e não-paramétricos supracitados foram aplicados aos dados da série pluviométrica, dos índices de seca

e aridez, e de vegetação, no período de janeiro de 1961 a dezembro de 2016, com níveis de significância (α) de 0,05 e 0,01 empregando o software TREND (Chiew *et al.*, 2017) recomendado pela *World Meteorological Organization* (WMO, 1996).

Teste de Mann-Kendall

Segundo Chiew *et al.* (2017), este método testa se existe uma tendência nos dados da série temporal, onde os n valores da série ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) são substituídos por suas classificações relativas ($R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$), a partir do valor 1 e regride até o menor valor até alcançar n , ou seja, utiliza um processo de hierarquização, como um ranking de dados utilizando a Equação 5.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \left[\sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(R_i - R_j) \right] \quad (5)$$

Onde:

$\text{sgn}(x) = 1$ para $x > 0$

$\text{sgn}(x) = 0$ para $x = 0$

$\text{sgn}(x) = -1$ para $x < 0$

Se a hipótese nula (H_0) for verdadeira, então S possui uma distribuição normal com $\mu = 0$ e $\sigma = n(n-1)(2n+5) / 18$. Um valor positivo de S indica que há uma tendência crescente e vice-versa.

Teste de Spearman's Rho

De acordo com Chiew *et al.* (2017) é um teste baseado em um ranking que determina se a correlação entre duas variáveis é significativa. Na análise de tendências, uma variável é tomada como o tempo em si (anos) e a outra como os dados correspondentes da série temporal. No teste de Mann-Kendall, os valores da série n são substituídos por suas classificações, onde ρ_s é o coeficiente de correlação, que é obtido da mesma forma que o coeficiente de correlação usual da amostra, mas usando a Equação 6.

$$\rho_s = S_{xy} / (S_x \cdot S_y)^{0,5} \quad (6)$$

Onde:

$$S_x = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

$$S_y = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})$$

X_i = tempo (dias, meses, anos)

Y_i = variável de interesse,

$\bar{X}$ e $\bar{Y}$ = referem-se aos rankings ($\bar{X}$, $\bar{Y}$, S_x e S_y têm o mesmo valor em uma análise de tendências).

Para grandes amostras, a quantidade $\rho_s \sqrt{n-1}$ é distribuída normalmente com média de 0 e variância de 1.

Teste de Cusum

Conforme Chiew *et al.* (2017), este método analisa se duas partes de uma única série de dados são diferentes (para um tempo de mudança desconhecido). A partir de uma determinada série temporal ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$), a estatística do teste é definida pela Equação 7.

$$V_k = \sum_{i=1}^k \text{sgn}(X_i - X_{\text{median}}) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

Onde:

$\text{sgn}(x) = 1$ para $X > 0$

$\text{sgn}(x) = 0$ para $X = 0$

$\text{sgn}(x) = -1$ para $X < 0$

X_{median} é o valor médio do conjunto de dados X_i .

A distribuição de V_k segue a estatística de duas amostras de Kolmogorov-Smirnov ($KS = (2/n) \max |V_k|$) com os valores críticos de $\max |V_k|$: $1,22\sqrt{n}$ para $\alpha = 0,10$; $1,36\sqrt{n}$ para $\alpha = 0,05$; e $1,63\sqrt{n}$ para $\alpha = 0,01$.

Um valor negativo de V_k indica que a última parte do registro tem uma média maior do que a parte anterior e vice-versa.

Teste de Rank-Sum

Este método testa se as medianas em dois períodos diferentes são diferentes. Para tanto, o método calcula a estatística por meio de classificação de todos os dados, partindo de 1 (menor valor) para N (maior valor). Nesse teste, caso ocorra à

presença de valores de dados iguais, utiliza-se a média das classificações (Chiew *et al.*, 2017).

A estatística S é calculada por meio da soma das classificações das observações no grupo menor (n) e do grupo maior (m), que é utilizado para obter a média teórica e o desvio padrão de S sob H_0 para toda a amostra utilizando a Equação 8.

$$\mu = \frac{n(N+1)}{2} \quad (8)$$

$$\sigma = [n \cdot m(N+1)/12]^{0,5}.$$

A forma padronizada da estatística do teste Z_{rs} é calculada como:

$$Z_{rs} = (S - 0,5 \mu) / \sigma \text{ se } S > \mu$$

$$Z_{rs} = 0 \text{ se } S = \mu$$

$$Z_{rs} = |S + 0,5 - \mu| / \sigma \text{ se } S < \mu$$

Z_{rs} é normalmente distribuído, e os valores críticos de testes críticos para vários níveis de significância podem ser obtidos a partir de tabelas de probabilidade normal.

Teste de Linear Regression

De acordo com Chiew *et al.* (2017), esse teste avalia se existe uma tendência linear ao examinar a relação entre o tempo (x) e a variável de interesse (y), usando a Equação 9.

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (9)$$

E a interceptação é estimada como $a = \bar{Y} - b \cdot \bar{X}$. O teste estatístico S é $S = b/\sigma$

Onde:

$$\sigma = \sqrt{\frac{12 \sum_{i=0}^n (Y_i - a - bx_i)}{n(n-2) \cdot (n^2 - 1)}}$$

A estatística de teste S segue uma distribuição Student-t com $n-2$ graus de liberdade sob a hipótese nula (H_0). O teste de regressão linear assume que os dados são normalmente distribuídos e que os erros (desvios da tendência) são independentes e seguem a mesma distribuição normal.

Teste de Cumulative Deviation

Este método consiste em testar se os meios de duas partes de um registro são diferentes para um determinado tempo de mudança. O objetivo deste teste é detectar uma alteração na média de uma série de tempo após m observações, sendo $E(x_i) = \mu$ e $i = 1, 2, 3, \dots, m$; e $E(x_i) = \mu + \Delta$ e $i = m + 1, m + 2, \dots, n$. Onde μ é a média antes da mudança e Δ é a mudança na média (Chiew *et al.*, 2017). Os desvios acumulados dos meios são calculados usando a Equação 10.

$$S_0 = 0 \quad S_k = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

E as somas parciais ajustados redimensionadas são obtidas dividindo o valor de S_k pelo valor do desvio padrão da Equação 11.

$$S_K = S_K/D_x \quad D_{X^2} = \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n} \quad (11)$$

O teste estatístico Q é calculado usando a fórmula $Q = \max|S_K|$ para cada ano, e o valor mais alto observado indica o ponto de mudança, onde o valor negativo de S_k indica que a última parte da série tem uma média maior do que a parte anterior da série e vice-versa.

Teste de Worsley likelihood

Segundo Chiew *et al.* (2017), este método testa se as médias em duas partes da série de dados são diferentes para um tempo de mudança desconhecido. O teste define pesos para os valores de S_k a depender da sua posição na série temporal estudada, conforme apresentado na Equação 12.

$$Z_K = [k(n - k)]^{-0,5} S_K \quad Z_K = Z_K/D_x \quad (12)$$

O teste estatístico W é dado pela Equação 13.

$$W = \frac{(n - 2)^{0,5} V}{(1 - V^2)^{0,5}} \quad \text{onde} \quad V = \max|Z_K| \quad (13)$$

O valor de W negativo indica que a última parte da série de dados analisada possui uma média maior do que a parte anterior da série e vice-versa.

Teste de Student's

Para Chiew *et al.* (2017), este teste analisa se a média em dois períodos distintos dentro da mesma série de dados é diferente por meio da Equação 14.

$$t = \frac{(\bar{X} - \bar{Y})}{s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{m}}} \quad (14)$$

Onde $\bar{X}$ e $\bar{Y}$ representam respectivamente as médias do primeiro e segundo período da série de dados, e m e n são o número de observações no primeiro e segundo período respectivamente, e S é a amostra do desvio padrão de todas as observações m e n.

4.3 NORMAIS CLIMATOLÓGICAS

Para a avaliação de mudança de tendência em escala temporal foram utilizados os dados das Normais Climatológicas Padronizadas do Brasil no período de 1961 a 1990 e de Normais Provisórias no período de 1991 a 2016, ambos obtidos por meio de estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

De acordo com INMET (2009), na região da bacia do rio Brígida existe 02 (duas) estações meteorológicas convencionais (Tabela 7), a de Cabrobó (82886) e a de Ouricuri (82753), ambas localizadas nos municípios homônimos do Estado de Pernambuco.

Tabela 7 – Estações convencionais localizadas na bacia do rio Brígida - PE.

Nome	Código	Município	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Cabrobó	82886	Cabrobó	08°31'S	39°20'W	341,5
Ouricuri	82753	Ouricuri	07°54'S	40°03'W	459,3

Fonte: INMET (2009).

Como a série de dados da estação meteorológica de observação de superfície convencional de Cabrobó é mais extensa (1927 até 2017), optou-se por utilizar os seus dados das Normais Climatológicas Padronizadas e Normais Provisórias, sendo utilizados os dados da estação de Ouricuri (82753) e da estação de Petrolina (82983), apenas para realizar o preenchimento de falhas, na ocorrência da ausência de dados da estação de Cabrobó, no período estudado.

Com o intuito de caracterizar os elementos do clima da região foram utilizados dados de direção do vento, velocidade do vento, insolação, precipitação, número de

dias de precipitação, temperatura do ar e umidade relativa, todos descritos no Capítulo 3.

Além disso, os dados de temperatura, precipitação e número de dias de precipitação foram empregados nas análises dos índices de seca e de aridez.

Importante ressaltar que nos casos em que foram detectados falhas na série de dados para ambas as estações situadas na bacia do rio Brígida (Cabrobó e Ouricuri), foi utilizado os dados da estação mais próxima localizada na mesma tipologia climática de acordo com classificação do CONDEPE/FIDEM (2016), que neste caso, foi a estação convencional de Petrolina (82983).

Para o processo de preenchimento de falhas das normais climatológicas foi utilizado o aplicativo desenvolvido por Azevedo (2017), onde se empregaram os mesmos métodos estatísticos descritos no item 4.1 para o preenchimento da série pluviométrica.

4.4 ÍNDICES DE SECA

A fim de definir os períodos secos e úmidos ocorridos na bacia do rio Brígida no período de 1961 a 2016, assim como, qual método melhor se adequava a região, foram utilizados 04 (quatro) métodos de índice de seca, os quais se encontram descritos a seguir.

Para estimar os índices de seca foram empregados os dados de precipitação pluviométrica individual dos 38 (trinta e oito) postos localizados na bacia do rio Brígida.

4.4.1 Índice de Anomalia de Chuva (RAI)

O Índice de Anomalia de Chuva ou *Rainfall Anomaly Index* (RAI), desenvolvido por Rooy (1965), tem por objetivo identificar na série de precipitação anomalias extremas de ordem positiva e negativa e, desse modo, conseguir classificar períodos secos e úmidos. O método de RAI pode ser estimado usando as Equações 15 e 16.

$$RAI = 3 \left[\frac{(p - \bar{p})}{\bar{m} - \bar{p}} \right] \text{ para anomalias de ordem positiva} \quad (15)$$

$$RAI = -3 \left[\frac{(p - \bar{p})}{\bar{x} - \bar{p}} \right] \text{ para anomalias de ordem negativa} \quad (16)$$

Onde:

p = precipitação mensal (mm)

$\bar{p}$ = precipitação média mensal da série histórica (mm)

$\bar{m}$ = média dos dez valores mais altos mensais da série histórica (mm)

$\bar{x}$ = média dos dez valores mais baixos mensais da série histórica (mm)

Os valores do RAI estimados são ordenados em categorias, de acordo com os níveis de umidade e de seca, como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 – Categorias do Índice de Anomalia de Chuva (RAI).

Categoria do RAI	Valor do RAI	Classificação do RAI
R0	$\geq 4,0$	Extremamente Úmido
R1	$\geq 2,0$ e $< 4,0$	Muito Úmido
R2	> 0 e $< 2,0$	Úmido
R3	0	Sem Anomalia
R4	< 0 e $> -2,0$	Seco
R5	$\leq -2,0$ e $> -4,0$	Muito Seco
R6	$\leq -4,0$	Extremamente Seco

Fonte: adaptado de Rooy (1965).

Para efeitos de elaboração da presente tese foi efetuada uma adaptação na categoria de classificação R3 apresentada na Tabela 8, eliminando-a, haja vista que valores de RAI igual a zero raramente ocorrem. Esse procedimento também foi adotado por diversos autores, a exemplo de Freitas (2005), Araújo (2004) e Araújo *et al.* (2009).

4.4.2 Índice de Precipitação Padronizado (SPI)

O Índice de Precipitação Padronizado ou *Standardized Precipitation Index* (SPI) é um índice de seca que foi desenvolvido por McKee *et al.* (1993) para quantificar o déficit de precipitação em múltiplas escalas de tempo a fim de analisar o impacto da seca na disponibilidade das fontes de água.

Esse método se baseia no registro de precipitação de longo prazo (no mínimo 30 anos) sendo ajustado através da distribuição gama, que se converte posteriormente em uma distribuição normal com média igual a zero e variância unitária. A precipitação utilizada no SPI pode ser usada para calcular o percentual atual da precipitação média para o período de tempo de i meses, o que serve para monitorar tanto períodos secos como chuvosos.

De acordo com Fernandes *et al.* (2009), a distribuição gama é definida pela função de densidade de probabilidade dada pela Equação 17.

$$g(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta\alpha} X^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (17)$$

Onde:

$\alpha > 0$ = parâmetro de forma (adimensional)

$\beta > 0$ = parâmetro de escala (mm)

$X > 0$ = total de precipitação (mm)

$\Gamma(X)$ = função gama obtida pela fórmula $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} \cdot e^{-y} \cdot dy$

Os parâmetros de forma (α e β) da função de densidade de probabilidade foram estimados para cada estação utilizando o método da máxima verossimilhança de Thom (1966) por meio da Equação 18.

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad \beta = \frac{\bar{X}}{\alpha} \quad A = \ln(\bar{X}) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \ln(x) \quad (17)$$

Onde:

$\bar{X}$ = média aritmética da precipitação pluvial (mm);

$\ln$ = logaritmo neperiano;

N = número de observações de precipitação.

Os resultados dos parâmetros de forma e escala são então usados para encontrar a probabilidade cumulativa de um evento de precipitação observado para uma escala de tempo mensal, através da Equação 19.

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)_0} \int_0^x x^{\alpha-1} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}} \cdot dx \quad (18)$$

Substituindo $t = \frac{x}{\beta}$, a equação acima se transforma na função gama incompleta da equação $G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^X t^{\alpha-1} \cdot e^{-t} \cdot dt$. A função gama (Γ) não é definida para $x=0$ e como as estações pluviométricas podem conter zeros, a distribuição de probabilidade acumulada toma o seguinte aspecto: $H(x) = q + (1 - q) \cdot G(x)$.

Onde:

$H(x)$ = distribuição de probabilidade cumulativa;

q = probabilidade de ocorrência de valores nulos (zeros) dado por $q = m/n+1$, onde m é o número de zeros e n é o tamanho da amostra;

$G(x)$ = distribuição cumulativa teórica.

A distribuição de probabilidade cumulativa $H(x)$ é transformada em uma variável aleatória normalizada (Z) com média igual a zero e desvio padrão igual a um, onde a variável (Z) corresponderá ao valor de SPI. Dessa forma, a relação entre

as distribuições de probabilidade Gama e Normal pode ser estimada pelas Equações 20 e 21.

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (19)$$

$$Z = SPI = + \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ para } 0,5 < H(x) \leq 1 \quad (20)$$

Onde:

$$C_0 = 2,515517; C_1 = 0,802853; C_2 = 0,010328;$$

$$d_1 = 1,432788; d_2 = 0,189269; d_3 = 0,001308$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \text{ para } 0 < H(x) \leq 0,5$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{1 - (H(x))^2} \right]} \text{ para } 0,5 < H(x) \leq 1$$

Segundo Mckee *et al.* (1993), um evento de seca para a escala de tempo *i* inicia no primeiro mês da série analisada com valor negativo e quando a soma subsequente do SPI alcançar o valor $\leq -1,0$ e termina quando a soma contínua do SPI volta a apresentar valor zero ou positivo.

A intensidade da seca é arbitrariamente definida para os valores do SPI com as categorias apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Categorias do Índice de Precipitação Padronizado (SPI).

Categoria do SPI	Valor de SPI	Descrição
S0	$\geq 2,0$	Extremamente úmido
S1	1,5 a 1,99	Muito úmido
S2	1,0 a 1,49	Moderadamente úmido
S3	-0,99 a 0,99	Próximo ao normal
S4	-1,0 a -1,49	Seca Moderada
S5	-1,5 a -1,99	Seca Severa
S6	$\leq -2,0$	Seca Extrema

Fonte: WMO (2012).

Apesar de o SPI no presente estudo ter sido estimado para os períodos acumulados de 6, 12, 24, 36 e 48 meses. Optou-se por apresentar apenas o período de 48 meses, pois o SPI de longo prazo, mostra alterações na precipitação, relacionadas a secas de longo prazo. Aliado a isso, não houve distinção estatística independentemente do número de meses empregado, conforme será descrito no item 5.7.

4.4.3 Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)

O Índice de Severidade de Seca de Palmer ou *Palmer Drought Severity Index* (PDSI), desenvolvido por Palmer (1965), tem como objetivo fornecer medidas normalizadas das condições de umidade de solo de modo que seja possível efetuar comparações entre a duração de uma seca ou um período de umidade. O PDSI fornece decisões confiáveis com uma medida da anomalia de eventos de tempo recente para uma região e lugares de condições atuais em uma perspectiva histórica, além de fornecer detalhamentos espaciais e temporais de secas históricas. O PDSI pode ser obtido através da Equação 22.

$$PDSI_t = 0,897 \cdot PDSI_{t-1} + (Z_i/3) \quad (21)$$

Onde:

i = mês de interesse do índice

Z_i = índice de anomalia de umidade obtido pela equação $Z_i = (P_i - \bar{P}_i) \cdot K_i$

P_i = precipitação observada no mês i

K_i = constante de padronização

$\bar{P}_i$ = precipitação climatológica para as condições locais no mês i

$\bar{P}_i = \alpha_i ETP_i + \beta_i PR_i + \gamma_i PRO_i - \delta_i PL_i$

ETP = evapotranspiração potencial

PR = recarga potencial de umidade do solo

PRO = escoamento superficial potencial

PL = perda potencial de umidade do solo

Os parâmetros α , β , γ e δ foram obtidos através do balanço hídrico mensal de Hargreaves e Christiansen (1974) com o auxílio de programa computacional desenvolvido por Faeirstein (2019), no qual utilizou-se a Equação 23.

$$\alpha = \frac{\overline{ETR}}{\overline{ETP}} \quad \beta = \frac{\bar{R}}{\overline{PR}} \quad \gamma = \frac{\overline{RO}}{\overline{PRO}} \quad \delta = \frac{\bar{L}}{\overline{PL}} \quad (22)$$

Onde:

$\overline{ETR}$ = evapotranspiração real

$\bar{R}$ = recarga

$\overline{RO}$ = escoamento superficial

$\bar{L}$ = perda de umidade do solo

No balanço hídrico foi empregado os valores da capacidade de campo do solo (CC) apresentados no item 3.6 – Pedologia.

Para o cálculo da evapotranspiração potencial (mm/mês) foi empregado o método de Hargreaves e Christiansen (1974), por meio da fórmula $ETP = F \times TF \times CH$, onde F é o fator mensal dependente da latitude (mm/mês), TF é a temperatura média em °F e CH é o fator de correção da umidade relativa média mensal.

A constante de padronização (K_i) regional criada por Palmer (1965) foi adaptada por Limeira *et al.* (2006), conforme a condição local utilizando as Equações 24 a 26.

$$K_i = (21,87 \cdot \bar{K}_i) / \sum_{j=1}^{12} |P_j - \bar{P}_j| K_j \quad (23)$$

$$\bar{K}_i = 1,5 \log_{10} \left[\frac{(K_j + 2,8)}{|P_i - \bar{P}_i|} \cdot 25,4 \right] + 0,5 \quad (24)$$

$$K_j = \frac{(\overline{ETR}_i + \bar{R}_i + \overline{RO}_i)}{(\bar{P}_i + \bar{L}_i)} \quad (25)$$

K_j = razão entre a demanda e o suprimento de umidade

De acordo com os valores de PDSI é possível classificar os períodos úmidos ou secos em 11 (onze) classes, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Categorias do índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI).

Categoria do PDSI	Valor do PDSI *	Classe
P1	$\geq 4,0$	Extremamente úmido
P2	3,0 a 3,99	Muito úmido
P3	2,0 a 2,99	Moderadamente úmido
P4	1,0 a 1,99	Ligeiramente úmido
P5	0,50 a 0,99	Período úmido incipiente
P6	0,49 a -0,49	Próximo ao normal
P7	-0,50 a -0,99	Seca incipiente
P8	-1,0 a -1,99	Seca suave
P9	-2,0 a -2,99	Seca moderada
P10	-3,0 a -3,99	Seca severa
P11	$\leq -4,0$	Seca extrema

Fonte: Palmer (1965).

* Todos os valores foram convertidos de polegadas para mm (multiplicado por 25,4).

4.5 ÍNDICES DE ARIDEZ

A fim de avaliar a aridez na bacia do rio Brígida no período de 1961 a 2016, assim como, qual método melhor se adequa a região foram utilizados 03 (três) métodos de índice de aridez, os quais estão descritos a seguir.

4.5.1 Índice de Aridez de Martonne (MIA)

O Índice de Aridez de Martonne ou *Martonne Index of Aridity* (MIA) foi desenvolvido por Martonne (1926) para avaliar a aridez de determinado local utilizando apenas dados de precipitação e temperatura. Esse método pode ser empregado para estimar o índice de aridez anual usando a Equação 27 e o índice de aridez mensal empregando a Equação 28.

Importante frisar que foi escolhido o método mensal no presente estudo, haja vista que foi a mesma condição aplicada nos demais testes.

$$MIA = \frac{P}{T + 10} \quad (26)$$

Onde:

P = precipitação média anual (mm)

T = temperatura média anual (°C)

$$MIA = \frac{12 \cdot P_i}{T_i + 10} \quad (27)$$

P_i = precipitação mensal (mm) do mês analisado

T_i = temperatura mensal (°C) do mês analisado

Os valores do MIA estimados são ordenados em categorias, de acordo com os níveis de aridez, conforme pode ser observado na Tabela 11. Importante frisar que na região de estudo, foram observados valores igual a zero, desse modo a última classe (M5) foi adaptada, pois na versão original a faixa oscila entre > 0 e 5.

Tabela 11 – Categorias do Índice de Aridez de Martonne (MIA).

Categoria do MIA	Valor do MIA	Classificação do MIA
M0	> 60	Umidade Acima do Normal
M1	$> 30 \text{ e } \leq 60$	Úmido
M2	$> 20 \text{ e } \leq 30$	Umidade Abaixo do Normal
M3	$> 15 \text{ e } \leq 20$	Semiárido
M4	$> 5 \text{ e } \leq 15$	Árido
M5	$\geq 0 \text{ e } \leq 5$	Extremamente Árido

Fonte: Adaptado de Martonne (1926).

4.5.2 Índice de Aridez de Thornthwaite (AI)

O Índice de Aridez ou *Aridity Index* (AI) foi desenvolvido por Thornthwaite (1948) para quantificar o déficit ou superávit de água em determinada região utilizando a Equação 29.

$$AI = 100. \frac{P}{ETP} \quad (28)$$

Onde:

P = precipitação mensal (mm)

ETP = evapotranspiração potencial mensal (mm/mês) estimada por meio da Equação 30.

$$ETP = F_c. 16. \left(10. \frac{T}{I} \right)^a \quad (29)$$

Onde:

F_c = fator de correção em função da latitude e mês do ano

$a = 6,75.10^{-7}.I^3 - 7,71.10^{-5}.I^2 + 0,01792.I + 0,49239$ (mm/mês)

T = temperatura média mensal ($^{\circ}\text{C}$)

I = índice anual de calor obtido pela fórmula $I = \sum_{i=1}^{12} i$

i = índice mensal de calor obtido pela fórmula $i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$

Apesar de o AI sugerir a utilização do método de Thornthwaite para o cálculo da evapotranspiração potencial, há um entendimento na comunidade científica para

o emprego do método de Hargreaves e Christiansen (1974), haja vista que os seus cálculos foram adaptados as condições climáticas do semiárido brasileiro, onde a bacia de estudo encontra-se situada.

Desse modo, para a obtenção da evapotranspiração (mm/mês) foi usada a fórmula $ETP = F \times TF \times CH$, onde F é o fator mensal dependente da latitude (mm/mês), TF é a temperatura média em °F e CH é o fator de correção da umidade relativa média mensal.

Os valores de AI estimados são ordenados em categorias, de acordo com os níveis de aridez, conforme pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12 – Categorias do Índice de Aridez de Thornthwaite (AI).

Categoria do AI	Valor do AI	Classificação do AI
A0	≥ 0 e $\leq 16,7$	Pouca ou nenhuma deficiência hídrica
A1	$> 16,7$ e $\leq 33,3$	Moderada deficiência hídrica
A2	$> 33,3$	Grande deficiência hídrica

Fonte: Thornthwaite (1948).

4.5.3 Índice de Aridez de Áreas Suscetíveis a Desertificação (AI_{ASD})

O Índice de Aridez de Áreas Suscetíveis a Desertificação (AI_{ASD}) consiste em uma classificação proposta pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) desenvolvido pela UNESCO (1979) para acompanhar a evolução das Áreas Suscetíveis ao Processo de Desertificação (ASD) no mundo, haja vista que o Brasil é signatário da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação (UNCCD) desde 1997, o presente estudo optou por empregá-la.

De acordo com esse tratado, o grau de aridez de uma região depende da quantidade de água advinda da chuva e da perda máxima possível de água pela evapotranspiração potencial (Equação 31).

$$AI_{ASD} = \frac{P}{ETP} \quad (30)$$

Onde:

AI_{ASD} = índice de aridez de áreas suscetíveis a desertificação

P = precipitação mensal (mm)

ETP = evapotranspiração potencial mensal (mm)

Os valores de AI_{ASD} estimados foram ordenados em zonas, as quais quanto mais áridas, mais suscetíveis aos processos de desertificação, conforme pode ser observado na Tabela 13.

Tabela 13 – Classificação do AI_{ASD} proposto pela UNESCO (1979) e adaptado pela Resolução CONAMA.

Categoria do AI_{ASD}	Valor do AI_{ASD}	Classificação do AI_{ASD}
AI1	$\leq 0,05$	Zona Hiper-árida
AI2	$> 0,05$ e $\leq 0,20$	Zona Árida
AI3	$> 0,20$ e $\leq 0,50$	Zona Semiárida
AI4	$> 0,50$ e $\leq 0,65$	Zona Subúmida Seca
AI5	$> 0,65$	Zona Subúmida Úmida

Fonte: MMA (2012).

4.6 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO

A partir dos resultados dos índices de seca e de aridez obtidos mediante metodologia descrita nos itens 4.4 e 4.5 foram analisados para o mesmo período 05 (cinco) índices de vegetação distintos (item 4.6.1 a 4.6.5), a fim de observar se os dados de campo se correlacionam com os dados obtidos mediante análise de sensoriamento remoto, e se poderiam se tornar uma ferramenta de monitoramento eficaz e preventiva quanto a seca, aridez e susceptibilidade a desertificação na bacia do rio Brígida.

Imagens Landsat-5

No presente estudo, foram empregadas imagens de satélite Landsat-5 sensor TM (*Thematic Mapper*) com resolução espacial de 30 m e temporal de 16 dias, georreferenciadas no sistema de projeção UTM (*Universal Transversa de Mercator*) e datum de referência WGS84, adquiridas gratuitamente no acervo da *United States Geological Survey* (USGS) correspondente a órbita/ponto 217/65 e 217/66, que reunidas perfazem a área de estudo.

Os dados disponíveis para a bacia do rio Brígida estão compreendidos entre novembro de 1986 e agosto de 2011 (Tabela 14), período este, que serviu de base para a comparação com os resultados dos índices de seca e aridez obtidos, sendo usadas, no total 19 (dezenove) imagens.

Tabela 14 – Data das imagens empregada na avaliação dos índices de vegetação.

Imagem	Data das Imagens
1	28/11/1986
2	23/05/1987
3	24/06/1987
4	16/06/1990
5	17/12/1993
6	02/11/1994
7	15/05/1996
8	26/09/1998
9	28/10/1998
10	04/10/2001
11	06/07/2003
12	12/10/2004
13	15/10/2005
14	30/07/2006
15	22/01/2007
16	21/09/2008
17	24/09/2009
18	27/11/2009
19	29/08/2011

Fonte: A Autora (2020).

O quantitativo de apenas 19 (dezenove) imagens para a região de estudo, foi devido ao critério adotado de baixo nível de cobertura de nuvens, de até 3%.

Segundo EMBRAPA (2013), os sensores TM do satélite Landsat-5 possui 07 (sete) bandas, sendo que cada banda representa uma faixa do espectro eletromagnético captada pelo satélite, com uma resolução espacial específica conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Especificações das bandas do satélite Landsat-5.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Resolução Radiométrica
TM (Thematic Mapper)	(B1) Azul	0,45 – 0,52 μm	30 m	16 dias	185 km	8 bits
	(B2) Verde	0,52 – 0,60 μm				
	(B3) Vermelho	0,63 – 0,69 μm				
	(B4) Infravermelho Próximo	0,76 – 0,90 μm				
	(B5) Infravermelho Médio	1,55 – 1,75 μm	120 m			
	(B6) Infravermelho Termal	10,4 – 12,5 μm				
	(B7) Infravermelho Médio	2,08 – 2,35 μm				

Fonte: EMBRAPA (2013).

De acordo com INPE (2017), os sensores TM do satélite Landsat-5 possui características e aplicações distintas, de acordo com cada banda espectral, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Principais características e aplicações do satélite Landsat-5.

Banda	Descrição	Características e aplicações do satélite LANDSAT 5
1	Azul	Apresenta grande penetração em corpos de água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares (carotenóides). Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial. Pode apresentar atenuação pela atmosfera.
2	Verde	Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Boa penetração em corpos de água.
3	Vermelho	A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex.: campo, cerrado e floresta). Permite análise da variação litológica em regiões com pouca cobertura vegetal. Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da mata galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, incluindo identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas.
4	Infravermelho Próximo	Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Serve para análise e mapeamento de feições geológicas e estruturais. Serve para separar e mapear áreas ocupadas com <i>pinus</i> e <i>eucalipto</i> . Serve para mapear áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas. Permite a visualização de áreas ocupadas com macrófitas aquáticas (ex.: aguapé). Permite a identificação de áreas agrícolas.
5	Infravermelho Médio 1	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite.
6	Infravermelho Termal	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7	Infravermelho Médio 2	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

Fonte: INPE (2017).

Processamento das Imagens

Antes da estimativa dos índices de vegetação foi necessária a realização de 02 (dois) procedimentos: a calibração radiométrica e a reflectância espectral.

A calibração radiométrica consiste em transformar o Número Digital (ND), cujos valores variam de 0 a 255 (8 bits) em radiância espectral ($L_{\lambda i}$). Para tanto, foi usado o software de geoprocessamento ArcGIS® e empregou-se a Equação 32 desenvolvida por Markham e Barker (1987).

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} \cdot ND \quad (31)$$

Onde:

$L_{\lambda i}$ = radiância espectral

a_i = radiância espectral mínima obtida da Tabela 17

b_i = radiância espectral máxima obtida da Tabela 17

ND = número digital (valor do pixel) obtido da imagem para cada banda (i)

A reflectância espectral para cada banda ($\rho_{\lambda i}$) é definida como a razão entre o fluxo de radiação refletido e o fluxo de radiação incidente, que é calculado usando a Equação 33 para imagens Landsat-5 (Waters et al., 2002).

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{K_{\lambda i} \cdot \cos \theta \cdot d_r} \quad (32)$$

Onde:

$K_{\lambda i}$ = irradiância espectral no topo da atmosfera obtido na Tabela 17

$\cos \theta$ = ângulo zenital solar obtido no metadados da imagem Landsat

d_r = distância relativa entre a terra e o sol obtida através da Equação 34 definida por Duffie e Beckman (1980)

$$d_r = 1 + 0,33 \cos \left(\frac{DSA \cdot 2\pi}{365} \right) \quad (33)$$

DSA = dia sequencial do ano obtido da Tabela 6.5 de Waters et al. (2002).

Tabela 17 – Valores de radiância e irradiância espectral do Landsat-5 adotados.

Banda	a_i	b_i 1	b_i 2	b_i 3	$K_{\lambda i}$
1	-1,52	152,10	193	169	1957
2	-2,84	296,81	365	333	1796
3	-1,17	204,30	264	264	1536
4	-1,51	206,20	221	221	1031
5	-0,37	27,19	30,2	30,2	220
6	1,2378	15,303	15,303	15,3030	-
7	-0,15	14,38	16,5	16	83,44

Fonte: Chander et al. (2009).

Legenda: b_i 1 = até 04 de maio de 2003; b_i 2 = a partir de 05 de maio de 2003 até 02 de abril de 2007; b_i 3 = após 02 de abril de 2007.

Após a obtenção dos valores de radiância e reflectância todos os índices de vegetação foram processados com o auxílio do software ArcGIS ®, conforme metodologia descrita a seguir nos itens 4.6.2 a 4.6.5.

4.6.1 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada ou *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), desenvolvido por Rouse *et al.* (1973) usado como ferramenta para o monitoramento da vegetação, haja vista que permite a construção de perfis sazonais e temporais das atividades da vegetação em diferentes períodos anuais, além disso pode ser empregado para avaliação de estudos climáticos e florestais por meio da Equação 35.

O NDVI é classificado no intervalo que varia de -1 a +1, onde os valores mais elevados correspondem a áreas com maior quantidade de vegetação fotossinteticamente ativa e valores baixos correspondem a áreas com menor quantitativo de vegetação.

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V)} \quad (34)$$

Onde:

ρ_{IVP} = banda espectral infravermelho próximo

ρ_V = banda espectral vermelho

Os resultados de NDVI foram categorizados de acordo com as faixas apresentadas na Tabela 18 para avaliar se ao longo da escala temporal houve intensificação dos períodos secos na região.

Tabela 18 – Classificação do NDVI para a cobertura vegetal.

Categoria do NDVI	Valor do NDVI	Classificação
N1	< 0	Extremamente Seco
N2	> 0 e ≤ 0,2	Seco
N3	> 0,2 e ≤ 0,4	Moderadamente Seco
N4	> 0,4 e ≤ 0,6	Úmido
N5	> 0,6	Extremamente úmido

Fonte: Adaptado de Aziz *et al.* (2018); Berhan *et al.* (2011) e Aquino *et al.* (2018).

4.6.2 Índice de Vegetação Melhorado (EVI)

O Índice de Vegetação Melhorado ou *Enhanced Vegetation Index* (EVI) foi desenvolvido por Justice *et al.* (1998) para otimizar o sinal de vegetação, melhorando a sensibilidade de sua detecção em regiões com elevada densidade de biomassa e para reduzir a influência do sinal do solo e da atmosfera sobre a resposta do dossel (Equação 36).

$$EVI = G \cdot \left[\frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{L + \rho_{IVP} + C_1 \cdot \rho_V - C_2 \cdot \rho_A} \right] \quad (35)$$

Onde:

G = fator de ganho com valor igual a 2,5

ρ_{IVP} = banda espectral infravermelho próximo

ρ_V = banda espectral vermelho

L = fator de ajuste para o solo com valor igual a 1

C_1 = coeficiente de ajuste para efeito de aerossol da atmosfera igual a 6

C_2 = coeficiente de ajuste para efeito de aerossol da atmosfera igual a 7,5

ρ_A = banda espectral azul

Os valores dos coeficientes adotados por Justice *et al.* (1998) na equação acima apresentada foram definidos por Huete *et al.* (1997).

O EVI é classificado no intervalo que varia de valores positivos à negativos, onde os valores mais elevados correspondem a áreas com vegetação em melhor estado enquanto que valores baixos correspondem a áreas com menor quantitativo de vegetação.

O presente estudo propôs com base nos resultados obtidos, a categorização do EVI na bacia do rio Brígida apresentada na Tabela 19, para avaliar se ao longo da escala temporal houve intensificação dos períodos secos na região.

Tabela 19 – Classificação do EVI para a cobertura vegetal.

Categoria do EVI	Valor do EVI	Classificação
E1	< 0	Extremamente Seco
E2	> 0 e ≤ 0,2	Seco
E3	> 0,2 e ≤ 0,4	Moderadamente Seco
E4	> 0,4 e ≤ 0,6	Úmido
E5	> 0,6	Extremamente úmido

Fonte: Adaptado de Aziz *et al.* (2018); Berhan *et al.* (2011) e Aquino *et al.* (2018).

4.6.3 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI)

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo ou *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), elaborado por Huete *et al.* (1985) serviu para avaliar de modo mais eficaz vegetações com dosséis esparsos, as quais sofriam influência considerável do brilho do solo, o que promovia um valor subestimado de vegetação. Estes autores desenvolveram a Equação 37 adotando as constantes estudadas por Huete (1988).

$$SAVI = \left[\frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V + L} \right] \cdot (1 + L) \quad (36)$$

Onde:

ρ_{IVP} = banda espectral infravermelho próximo

ρ_V = banda espectral vermelho

L = constante que minimiza o efeito do solo e varia de 0 a 1

Os valores de L são 1 para densidades baixas de vegetação, 0,5 para densidades médias de vegetação e 0,25 para densidades altas de vegetação. No presente estudo foi adotado o valor de 0,5, pois segundo Huete (1988), esse valor corresponde ao fator de ajuste ideal, pois reduz o ruído do solo consideravelmente em toda a amplitude de vegetação.

O SAVI é classificado no intervalo que varia de valores positivos à negativos, onde os valores mais elevados correspondem a áreas com maior quantidade de vegetação e valores baixos correspondem a áreas com menor quantitativo de vegetação.

O presente estudo propôs com base nos resultados obtidos, a categorização do SAVI na bacia do rio Brígida conforme apresentado na Tabela 20, para avaliar se ao longo da escala temporal houve intensificação dos períodos secos na região.

Tabela 20 – Classificação do SAVI para a cobertura vegetal.

Categoria do SAVI	Valor do SAVI	Classificação
SA1	< 0	Extremamente Seco
SA2	> 0 e ≤ 0,2	Seco
SA3	> 0,2 e ≤ 0,4	Moderadamente Seco
SA4	> 0,4 e ≤ 0,6	Úmido
SA5	> 0,6	Extremamente úmido

Fonte: Adaptado de Aziz *et al.* (2018); Berhan *et al.* (2011) e Aquino *et al.* (2018).

4.6.4 Índice de Vegetação Padronizado (SVI)

O Índice de Vegetação Padronizado ou *Standardized Vegetation Index* (SVI), criado por Peters *et al.* (2002) para avaliar como as condições de vegetação estão intimamente ligadas às condições climáticas na atmosfera mais próxima do solo usando a Equação 38. Dessa forma, valores baixos de SVI indicam que a vegetação está fraca e que esse resultado pode ser decorrente das condições climáticas locais, como por exemplo, baixa umidade do solo, inundações ou temperaturas extremas; enquanto que valores elevados de SVI sugerem condições climáticas ideais para que os valores de vegetação fotossinteticamente ativa sejam maiores quando comparados a outros períodos.

$$SVI = \frac{(NDVI - \overline{NDVI})}{\sigma NDVI} \quad (37)$$

Onde:

$NDVI$ = índice de vegetação da diferença normalizada

$\overline{NDVI}$ = média do índice de vegetação da diferença normalizada

$\sigma NDVI$ = desvio padrão do índice de vegetação da diferença normalizada

Para a estimativa do SVI foi extraída a estatística descritiva (valores de média e desvio padrão) das células das imagens da série histórica com o auxílio da ferramenta *Spatial Analyst* do software ArcGIS®.

De acordo com a metodologia de Peters *et al.* (2002) os valores de SVI são distribuídos em 05 (cinco) classes, são elas: Muito Pobre (0 a 0,05), Pobre (0,05 a 0,25), Média (0,25 a 0,75), Bom (0,75 a 0,95) e Muito Bom (0,95 a 1,0).

Contudo, diversos autores brasileiros, dentre eles, Leivas *et al.* (2012), Sousa Júnior *et al.* (2011), etc. efetuaram uma nova proposição de classes que refletem as condições da vegetação no Brasil, conforme apresentado na Tabela 21. Essa classificação foi empregada para avaliar se ao longo da escala temporal houve redução da cobertura vegetal por conta da seca.

Tabela 21 – Categorias do Índice de Vegetação Padronizado (SVI).

Categoria do SVI	Valor de SVI	Descrição
SV1	$\leq -2,0$	Extremamente Seco
SV2	$> -2,0$ e $\leq -1,5$	Severamente Seco
SV3	$> -1,5$ e $\leq -1,0$	Moderadamente Seco
SV4	$> -1,0$ e $\leq 1,0$	Normal
SV5	$> 1,0$ e $\leq 1,5$	Moderadamente Úmido
SV6	$> 1,5$ e $\leq 2,0$	Severamente Úmido
SV7	$> 2,0$	Extremamente Úmido

Fonte: Leivas *et al.* (2012), Sousa Júnior *et al.* (2011), Sausen e Lacruz (2015).

4.6.5 Índice da Condição de Vegetação (VCI)

O Índice da Condição de Vegetação ou *Vegetation Condition Index* (VCI) foi elaborado por Liu e Kogan (1996) para quantificar o impacto do clima e detectar mudanças temporais e espaciais na vegetação, além de auxiliar na identificação de ocorrência de deterioração de recursos naturais ao longo do tempo, por meio da Equação 39.

$$VCI = \frac{(NDVI - NDVI_{MÍN})}{(NDVI_{MÁX} - NDVI_{MÍN})} \cdot 100 \quad (38)$$

Onde:

$NDVI$ = índice de vegetação da diferença normalizada

$NDVI_{MÍN}$ = valor mínimo do índice de vegetação da diferença normalizada

$NDVI_{MÁX}$ = valor máximo do índice de vegetação da diferença normalizada

O VCI é bastante usado para identificar situações de seca e o seu período de início, especialmente, em áreas onde esses episódios ocorrem de modo localizado e mal definido. Esse índice permite a avaliação do início, duração e gravidade da seca com base na mudança dos valores históricos da vegetação. Os valores de VCI variam de 0 a 100, onde valores abaixo de 36% sugerem estresse, acima de 36% e abaixo de 72%, situação normal para o crescimento da vegetação, e acima de 72% situação favorável a vegetação.

Além dessa classificação, Kogan (1998) propôs a classe de severidade do risco de seca, que varia de valores abaixo de 10% para seca extrema, acima de 10% e abaixo de 20% para seca severa, acima de 20% e inferior a 30% para seca moderada, acima de 30% e abaixo de 40% para caracterizar seca leve, e acima de 40% quando não há seca.

No presente estudo foi empregada a categorização apresentada na Tabela 22 para avaliar se ao longo da escala temporal houve redução da cobertura vegetal na bacia do rio Brígida, devido a intensificação da ocorrência de secas.

Tabela 22 – Classe de severidade do risco de seca para o VCI.

Categoria do VCI	Valor do VCI (%)	Classificação
V1	$> 0 \text{ e } \leq 20$	Extremamente Seco
V2	$> 20 \text{ e } \leq 40$	Seco
V3	$> 40 \text{ e } \leq 60$	Normal
V4	$> 60 \text{ e } \leq 80$	Úmido
V5	$> 80 \text{ e } \leq 100$	Muito úmido

Fonte: adaptado de Covele (2011); Moreira *et al.* (2015).

4.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Nesse item serão apresentadas as análises estatísticas usadas no presente estudo, consideradas cruciais a interpretação dos resultados e discussões obtidos.

4.7.1 Teste de Tukey

De modo a identificar qual foi o método de estimativa de índice de seca, aridez e vegetação que melhor se adequou a região da bacia do rio Brígida, os seus resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste estatístico de Tukey, aos níveis de 5% de probabilidade, com o auxílio do software Statistica ®.

Antes da aplicação do teste de Tukey, os índices de vegetação tiveram seus resultados submetidos a transformação logarítmica através da expressão $W_{ij} = \log(X_i + 1)$ para corrigir a normalidade da distribuição dos dados, tornando-os homogêneos segundo a análise do teste de Cochran (g), que é estimado através da fórmula $g = s^2_{\text{maior}} / \sum s_i^2$, onde s é a variância (Gotelli e Ellison, 2011).

O teste de Tukey foi aplicado pois é o mais indicado para efetuar comparação entre médias de dois tratamentos ou mais, desde que estes possuam o mesmo número de repetições (Mendes, 1999; Silva e Silva, 2003).

O teste de Tukey é calculado com base na Diferença Mínima Significativa (DMS), ou seja, o valor mínimo para que dois tratamentos sejam diferentes por meio da Equação 40.

$$DMS = q_{(\alpha\%)} \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad (39)$$

Onde:

q é a amplitude tabelada a um nível de significância ($\alpha\%$); QMR é o quadrado médio do resíduo obtido por meio de Análise de Variância (ANOVA); e r é o número de repetições de cada tratamento.

Toda vez que o valor absoluto da diferença entre duas médias é igual ou maior do que a diferença mínima significativa (DMS), as médias são consideradas estatisticamente diferentes, ao nível de significância estabelecido. A categorização das letras no teste de Tukey é feita a partir da construção de um quadro, onde as médias dos tratamentos são colocadas em ordem crescente ou decrescente, e em seguida acrescenta-se a letra “a” na primeira média, letra “b” para o segundo tratamento se diferente do primeiro tratamento, e assim por diante (Mendes, 1999).

4.7.2 Correlação Espacial

A partir dos resultados obtidos nos índices de seca e aridez foi efetuado teste de correlação espacial para avaliar se essas variáveis possuem relação com o índice de vegetação obtido por meio de sensoriamento remoto.

Para tanto, adotou-se o método *Multivariate Analysis* (MVA) ou simplesmente Análise Multivariada, que se refere a todas as técnicas estatísticas que analisam simultaneamente várias medidas em indivíduos ou objetos em uma ou mais amostras sob investigação, haja vista que o objetivo MVA é medir, explicar e prever o grau de relacionamento entre as variáveis (Hair Jr., 2014).

Normalmente, as variáveis são medidas simultaneamente em cada unidade de amostragem, e, tipicamente, essas variáveis estão correlacionadas. Atualmente dada a disponibilidade de técnicas multivariadas e poder de computação para realizá-las, a MVA vem sendo muito empregado, sobretudo nas áreas descritiva e de inferência estatística por meio da Matriz de Covariância e de Correlação (Rencher, 2002).

Dessa forma, no presente estudo, adotou-se a realização da Análise Multivariada por meio do software ArcGIS® e da ferramenta *Spatial Analyst Tools* → *Multivariate* → *Band Collection Statistics*, que computou as matrizes de covariância e

correlação, bem como os parâmetros estatísticos básicos, como os valores de mínimo, máximo, média e desvio padrão para cada camada de *raster*.

Matriz de Covariância

Segundo Snedecor e Cochran (1968) a matriz de covariância computada contém valores de variâncias e covariâncias. A variância é uma medida estatística que mostra a variação existente na média, que são calculados somando-se os quadrados das diferenças entre cada valor de célula e o valor médio de todas as células. As variâncias para cada camada podem ser lidas ao longo da diagonal da matriz de covariância, movendo-se da esquerda superior para a direita inferior. As variâncias são expressas em unidades de valor de célula ao quadrado.

As entradas restantes na matriz de covariância são as covariâncias entre todos os pares de rasters de entrada. A Equação 41 é usada para determinar a covariância entre as camadas i e j :

$$Cov_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N (Z_{ik} - \mu_i) (Z_{jk} - \mu_j)}{N-1} \quad (39)$$

Onde:

Z = valor de uma célula

i, j = camadas de uma pilha

μ = média de uma camada

N = número de células

k = indica uma célula específica

A covariância de duas camadas é a interseção da linha e coluna apropriadas. A covariância é semelhante à correlação, mas quando a covariância é calculada, os dados não são padronizados. Portanto, a covariância é expressa em unidades que variam de acordo com os dados e não é convertida para uma escala normalizada de -1 a +1, como a correlação. A partir do uso da covariância é possível determinar a direção de uma relação linear entre duas variáveis, da seguinte forma: se ambas as variáveis tendem a aumentar ou diminuir em conjunto, o coeficiente é positivo; enquanto que se uma variável tende a aumentar à medida que os outros diminuem, o coeficiente é negativo.

Matriz de Correlação

De acordo com Snedecor e Cochran (1968), a matriz de correlação mostra os valores dos coeficientes de correlação que representam o relacionamento entre dois conjuntos de dados, ou seja, apresenta os valores das células de uma camada raster, conforme eles se relacionam com os valores das células de outra camada. A correlação (r) entre duas camadas é uma medida de dependência entre as camadas que pode ser obtida através da Equação 42.

$$r = \frac{Cov_{ij}}{\delta_i \cdot \delta_j} \quad (40)$$

A correlação de Pearson (r) varia de +1 a -1. Uma correlação positiva indica uma relação direta entre duas camadas, como quando os valores das células de uma camada aumentam, é provável que também os valores das células de outra camada aumentem. Uma correlação negativa significa que uma variável muda inversamente para a outra. Uma correlação de zero significa que duas camadas são independentes uma da outra.

Segundo Hopkins (2002), os coeficientes de correlação de Pearson podem ser classificados de acordo com as classes apresentadas na Tabela 23.

Tabela 23 – Classificação do coeficiente de correlação de Pearson.

Coeficiente de correlação (r) (+ ou -)	Classificação
0,0 a 0,1	Muito Baixa
0,1 a 0,3	Baixa
0,3 a 0,5	Moderada
0,5 a 0,7	Alta
0,7 a 0,9	Muito Alta
0,9 a 1,0	Quase Perfeita

Fonte: Hopkins (2002).

Processamento das Camadas Raster

Para a verificação da correlação espacial entre os índices de seca e de aridez com os dados de sensoriamento remoto foi necessário representar espacialmente os valores obtidos no território da Bacia através de método de interpolação IDW (*Inverse Distance Weighting*) por meio do software ArcGIS®.

O método IDW aplicado determina os valores das células usando uma combinação linearmente ponderada de um conjunto de pontos amostrais, onde o peso é dado em função da distância inversa, assim, a superfície que está sendo interpolada deve ser a de uma variável localmente dependente, pois o método

pressupõe que a influência da distância sobre a variável mapeada diminui conforme a sua localização (ESRI, 2016).

4.7.3 Correlação Pontual

A correlação pontual foi efetuada em apenas 29, do total de 38 postos pluviométricos empregados no estudo dos índices de seca e aridez, pois 09 postos (839007, 839011, 840019, 840004, 839001, 839023, 839000, 739031 e 739028) se encontram fora do limite da bacia do rio Brígida, não sendo, portanto, computados nos índices de vegetação.

Inicialmente os resultados dos índices de seca, aridez e de vegetação foram extraídos de forma pontual, na localização dos 29 postos pluviométricos no interior da bacia com o auxílio do software ArcGIS ® e da ferramenta *Spatial Analyst Tools* → *Extraction* → *Extract Values to Points*.

Posteriormente, os valores dos índices de seca, de aridez e de vegetação foram submetidos a análise de distribuição de frequência para verificar o intervalo de valores possíveis, dentro da estimativa intervalar.

A estimativa intervalar se refere a um conjunto de números em torno da estimativa por ponto dentro do qual o valor do parâmetro deve estar. Os intervalos são geralmente escolhidos de forma que o parâmetro fique dentro de uma probabilidade de 95 ou 99%, chamado intervalo de confiança (Downing e Clark, 2010).

A média desses intervalos foram submetidos a análise de correlação pontual utilizando-se o coeficiente de determinação (R^2), cujo pode ser estimado através da Equação 43. O valor de R^2 varia no intervalo fechado de $0 \leq R^2 \leq 1$, onde quanto mais próximo de 1 sugere melhor ajuste da equação (Mendes, 1999).

$$R^2 = \frac{SQ_{reg}}{SQ_{total}} \quad (41)$$

Onde:

SQ_{reg} = soma dos quadrados da ANOVA para regressão

SQ_{total} = soma dos quadrados total da ANOVA para regressão

Para a análise de correlação pontual foi usada equações polinomiais de segunda ordem, haja vista que apresentaram melhores ajustes do que a equação linear.

Segundo Dantas (2012), o coeficiente de determinação (R^2) pode ser classificado de acordo com as classes apresentadas na Tabela 24.

Tabela 24 – Classificação do coeficiente de determinação (R^2).

Coeficiente de determinação (R^2)	Classificação
0,0	Nula
$> 0,0$ e $\leq 0,09$	Fraca
$> 0,09$ e $\leq 0,49$	Média
$> 0,49$ e $\leq 0,81$	Forte
$> 0,81$ e $\leq 0,9801$	Fortíssima
$> 0,9801$ e $\leq 1,0$	Perfeita

Fonte: Dantas (2012).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta os resultados da pesquisa desenvolvida, inclusive a consistência dos dados pluviométricos, análise de tendência pluviométrica, interpretação das normais climatológicas, avaliação dos índices de seca, aridez e de vegetação, assim como, o emprego do Teste de Tukey, e a observação das correlações espacial e pontual.

5.1 CONSISTÊNCIA DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Inicialmente foram relacionados 64 (sessenta e quatro) postos pluviométricos para os municípios situados na bacia do rio Brígida mediante análise no acervo de dados do Hidroweb (ANA, 2017). Contudo, antes da fase de preenchimento de falhas foram descartados 04 (quatro) postos, sendo 03 (três) postos (839020, 839039 e 840013) porque a série de dados era inferior a 01 (um) ano, e 01 (um) posto (740014) porque a série continha sete anos repletos de falhas.

Sendo assim, restaram 60 (sessenta) postos pluviométricos (Tabela 25) para a avaliação efetiva da série e processo de preenchimento de falhas conforme descrito no item 4.1, onde foi necessária a realização de 03 (três) tentativas para a completa homogeneização dos dados, onde restaram 50 (cinquenta) postos pluviométricos.

Tabela 25 – Dados dos 60 postos pluviométricos analisados na consistência da série pluviométrica.

(Continua)

Código	Nome da Estação	Responsável	Operadora	Município	Em Operação	Latitude	Longitude
739021 *	Bodocó	APAC-PE	APAC-PE	Bodocó	Sim	-7,80	-39,93
739025 *	Granito	SUDENE	SUDENE	Granito	Não	-7,72	-39,62
739026 *	Ipueira	SUDENE	SUDENE	Serrita	Não	-7,82	-39,48
739028 *	Serrita (Serrinha)	DNOCS	DNOCS	Serrita	Sim	-7,93	-39,32
739029 *	Sítio dos Moreiras	DNOCS	DNOCS	Moreilândia	Sim	-7,73	-39,55
739030 *	Sítio Estaca	SUDENE	SUDENE	Bodocó	Não	-7,95	-39,92
739031 *	Santa Rosa	SUDENE	SUDENE	Serrita	Não	-7,77	-39,17
739032 *	Timorante (Baixo)	SUDENE	SUDENE	Exú	Não	-7,68	-39,78
739033 *	Viração (Cana Brava)	SUDENE	SUDENE	Exú	Não	-7,50	-39,83
739034 *	Fazenda Colinas	SUDENE	SUDENE	Granito	Não	-7,92	-39,68
740013 *	Araripina (São Gonçalo)	APAC-PE	APAC-PE	Araripina	Não	-7,55	-40,57
740015 *	Açude Engenheiro Camacho	DNOCS	DNOCS	Ouricuri	Sim	-7,87	-40,15

Tabela 25 – Dados dos 60 postos pluviométricos analisados na consistência da série pluviométrica.

(Continuação).

Código	Nome da Estação	Responsável	Operadora	Município	Em Operação	Latitude	Longitude
740016 *	Barra de São Pedro (Manaca)	DNOCS	DNOCS	Ouricuri	Sim	-7,83	-40,33
740017 *	Feitoria (São Félix)	DNOCS	DNOCS	Bodocó	Sim	-7,53	-40,10
740018 *	Ipubi	SUDENE	SUDENE	Ipubi	Não	-7,65	-40,13
740020 *	Nascente (Olho D'água)	SUDENE	SUDENE	Araripina	Não	-7,83	-40,45
740021 *	Ouricuri	APAC-PE	APAC-PE	Ouricuri	Não	-7,88	-40,07
740023 *	Serra Branca Trindade (Espírito Santo)	SUDENE	SUDENE	Ipubi	Não	-7,57	-40,20
740025 *		DNOCS	DNOCS	Trindade	Sim	-7,75	-40,25
740029 *	Ouricuri	INMET	INMET	Ouricuri	Sim	-7,90	-40,05
839000 *	Algodoeiro	SUDENE	SUDENE	Santa Maria da Boa Vista	Não	-8,55	-39,88
839001 *	Açude Aboboras	SUDENE	SUDENE	Parnamirim	Não	-8,07	-39,43
839007 *	Fazenda Macambira	SUDENE	SUDENE	Cabrobó	Não	-8,40	-39,45
839008 *	Icaicara (Poço Cercado)	SUDENE	SUDENE	Parnamirim	Não	-8,08	-39,78
839009 *	Jacaré	ANA	CPRM	Parnamirim	Sim	-8,26	-39,85
839011 *	Orocó	SUDENE	SUDENE	Orocó	Não	-8,62	-39,60
839013 *	Parnamirim	ANA	CPRM	Parnamirim	Sim	-8,09	-39,57
839014 *	Poço do Fumo	ANA	CPRM	Parnamirim	Sim	-8,18	-39,73
839015 *	Fazenda Rodrigues	DNOCS	DNOCS	Santa Maria da Boa Vista	Sim	-8,38	-39,88
839023 *	Urimama	SUDENE	SUDENE	Santa Maria da Boa Vista	Não	-8,43	-39,95
839034 *	Fazenda Tapera	ANA	CPRM	Orocó	Sim	-8,52	-39,64
839047 *	Bom Jesus	SUDENE	SUDENE	Orocó	Não	-8,28	-39,65
840004 *	Bezerro	SUDENE	SUDENE	Ouricuri	Não	-8,38	-40,22
840011 *	Jacaré	SUDENE	SUDENE	Ouricuri	Não	-8,08	-40,20
840016 *	Matias	SUDENE	SUDENE	Parnamirim	Não	-8,18	-40,05
840019 *	Santa Cruz de Malta)	DNOCS	DNOCS	Ouricuri	Sim	-8,27	-40,25
840021 *	Santa Filomena (Munduri)	DNOCS	DNOCS	Ouricuri	Sim	-8,13	-40,58
840024 *	Varginha	SUDENE	SUDENE	Ouricuri	Não	-8,07	-40,42
739023	Exú (Novo Exú)	APAC-PE	APAC-PE	Exú	Não	-7,52	-39,72
739027	Serra das Tabocas	SUDENE	SUDENE	Exú	Não	-7,42	-39,85
740019	Morais	SUDENE	SUDENE	Araripina	Não	-7,65	-40,40
740024	Serrolândia	SUDENE	SUDENE	Ipubi	Não	-7,42	-40,18
839002	Cabrobó	APAC-PE	APAC-PE	Cabrobó	Sim	-8,50	-39,32
839003	Cabrobó	ANA	ANA	Cabrobó	Não	-8,50	-39,32
839004	Cabrobó	INMET	INMET	Cabrobó	Sim	-8,52	-39,33

Tabela 25 – Dados dos 60 postos pluviométricos analisados na consistência da série pluviométrica.
(Conclusão).

Código	Nome da Estação	Responsável	Operadora	Município	Em Operação	Latitude	Longitude
839006	Canto das Pedras	SUDENE	SUDENE	Cabrobó	Não	-8,32	-39,62
839010	Murici	SUDENE	SUDENE	Cabrobó	Não	-8,32	-39,15
839012	Parnamirim (Leopoldina)	DNOCS	DNOCS	Parnamirim	Sim	-8,08	-39,57
839018	Santa Maria da Boa Vista	DNOCS	DNOCS	Santa Maria da Boa Vista	Sim	-8,80	-39,83
839019	Santa Maria da Boa Vista	ANA	ANA	Santa Maria da Boa Vista	Não	-8,80	-39,83
839033	Orocó	CODEVASF	CODEVASF	Orocó	Não	-8,62	-39,60
839035	Santa Maria da Boa Vista	ANA	CPRM	Santa Maria da Boa Vista	Sim	-8,80	-39,82
840000	Alexandria	DNOCS	DNOCS	Santa Maria da Boa Vista	Não	-8,98	-40,15
840002	Açude Jatobá	SUDENE	SUDENE	Ouricuri	Não	-8,00	-40,30
840003	Barra Bonita	SUDENE	SUDENE	Santa Maria da Boa Vista	Não	-8,82	-40,20
840006	Campo Santo	SUDENE	SUDENE	Ouricuri	Não	-8,32	-40,57
840010	Fazenda São Bento	ANA	CPRM	Santa Maria da Boa Vista	Sim	-8,62	-40,00
840012	Jutaí (Jatobá de Sta. Barbara)	DNOCS	DNOCS	Santa Maria da Boa Vista	Sim	-8,63	-40,23
840015	Lagoa Grande	ANA	CPRM	Santa Maria da Boa Vista	Sim	-9,00	-40,27
940005	Malhada Real	DNOCS	DNOCS	Santa Maria da Boa Vista	Sim	-9,03	-40,02

Fonte: Hidroweb (ANA, 2017).

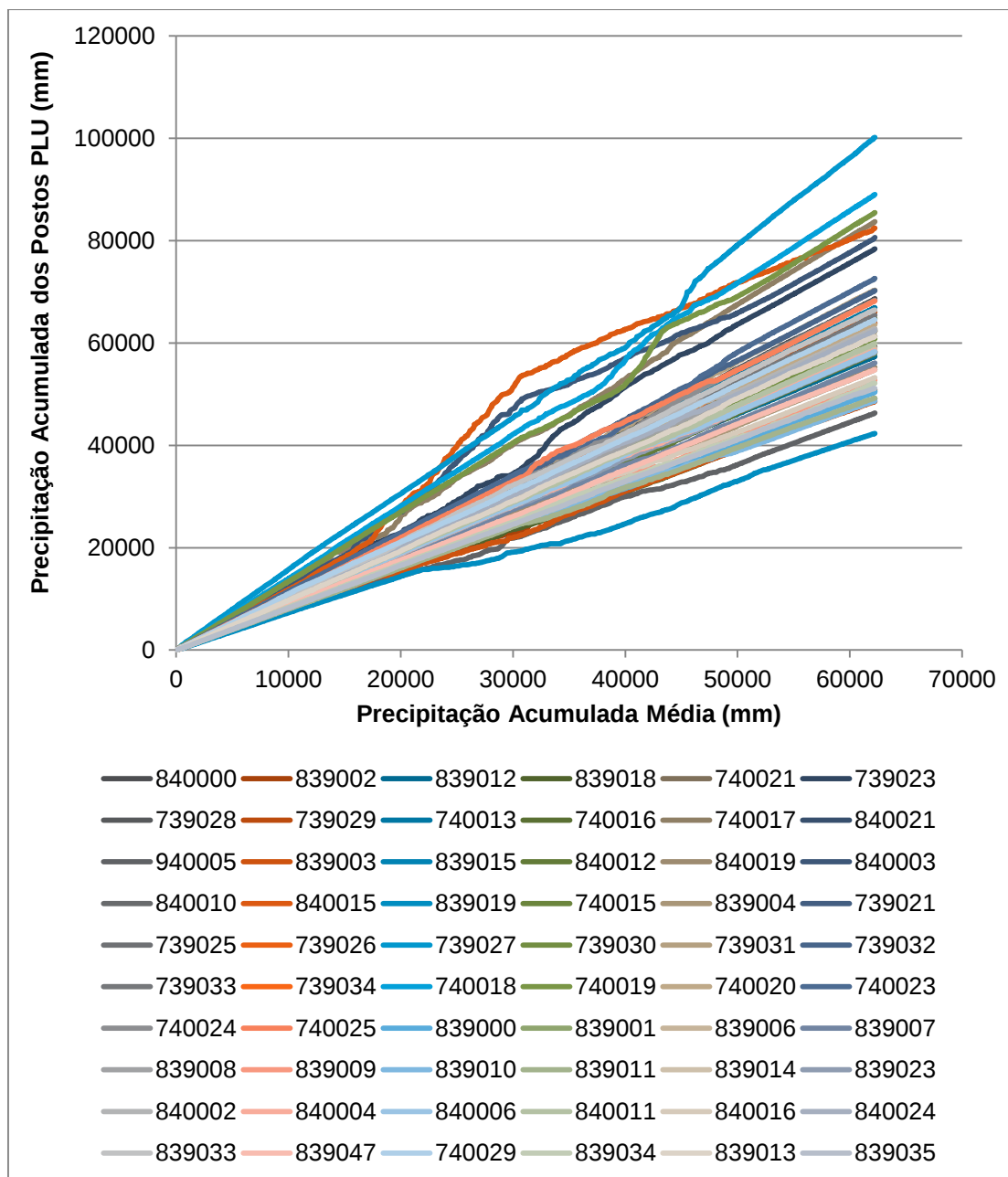
Legenda: * correspondem aos 38 postos pluviométricos usados nos estudos pluviométricos da Tese.

Logo em seguida foi efetuada a verificação da análise de consistência e homogeneização dos dados por meio do método de curva dupla massa, cujos dados de precipitação são descritos como consistentes quando a curva de um posto se aproxima de uma linha reta, como pode ser observada na Figura 10.

Nesse sentido, a análise da Figura 10 indicou que 08 (oito) postos pluviométricos (839012, 840003, 840015, 840002, 840010, 740024, 839035, 739023) apresentaram mudança significativa de direção da declividade da reta, e 02 (dois) postos pluviométricos (739027 e 740019) apresentaram leve desvio, ambos, sugerindo, que os valores dos postos consistidos não são proporcionais a aquele conjunto observado, sendo, portanto retirados do conjunto de dados. Vale ressaltar que os 08 (oito) postos que apresentaram mudança significativa na direção da reta também apresentaram indicação de modificações na tendência de precipitação

avaliada no item 5.2, ratificando a hipótese de que os dados não se enquadravam na tendência de comportamento pluviométrico dos demais postos.

Figura 10 – Curva de Dupla Massa dos 60 postos da bacia do rio Brígida.



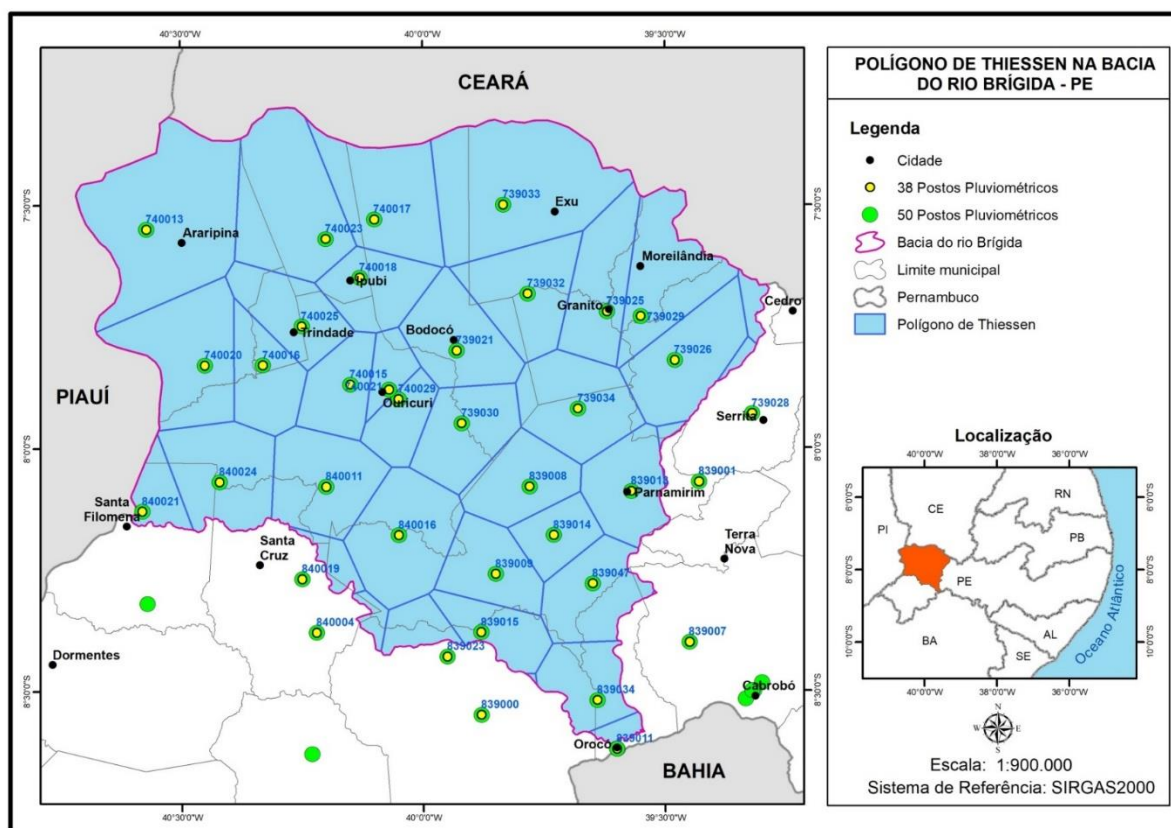
Fonte: A Autora (2020).

De acordo com Barbosa Júnior (2015) anormalidades no posto pluviométrico, decorrentes de mudança do local ou das condições de operação do aparelho, de erros sistemáticos, de mudanças climáticas ou de modificação no método de observação podem ser identificadas pela análise de dupla massa, onde os pontos não se alinham segundo uma única reta.

Posteriormente ao processo de preenchimento de falhas e de verificação de homogeneização dos dados por meio da curva de dupla massa, aplicou-se o método do polígono de Thiessen utilizando os 50 (cinquenta) postos pluviométricos restantes para composição da chuva média.

Sendo assim, verificou-se que dos 50 (cinquenta) postos pluviométricos, apenas 38 (trinta e oito) possuem área de influência direta no território da bacia do rio Brígida (Figura 11), sendo, estes, portanto, os utilizados para composição do estudo ora apresentado. Os 12 (doze) postos desconsiderados estão situados mais afastados da bacia e/ou muito próximos de outro posto pluviométrico.

Figura 11 – Polígono de Thiessen dos 38 postos pluviométricos na bacia do rio Brígida.



Fonte: A Autora (2020).

Os postos pluviométricos localizados nos municípios de Araripina, Trindade, Ipubi, Bodocó, Exú, Granito, Moreilândia e Serrita apresentaram tendência de diminuição de precipitação; enquanto que os postos situados nos municípios de Ouricuri, Parnamirim, Santa Maria da Boa Vista e Orocó não exibiram uma tendência clara, ou seja, alguns postos apresentaram tendência de aumento e outros de

diminuição para o mesmo município; e Cabrobó foi o único município que demonstrou aumento da precipitação.

Acredita-se que esse comportamento se deve ao efeito orográfico da região, haja vista que os postos pluviométricos que apresentaram tendência de diminuição da precipitação se situam na parte de altitude mais elevada na bacia, na Chapada do Araripe, enquanto que os postos com tendência não definida, se situam entre a parte mais elevada e a parte mais baixa, ao passo que o posto que está localizado no terreno com altitudes mais baixas apresentou elevação da precipitação.

De acordo com Oliveira e Galvani (2015), os sistemas orográficos, dependendo de como estão dispostos podem auxiliar, dificultar ou barrar o trânsito dos sistemas atmosféricos, disseminando-os de maneira assimétrica e, com isso, influenciar a distribuição e ocorrência espaço-temporal da chuva.

5.2 TENDÊNCIA PLUVIOMÉTRICA

Após as etapas de preenchimento de falhas e verificação de homogeneização dos dados realizou-se avaliação de tendência temporal utilizando o software TREND, onde foram aplicados testes estatísticos paramétricos e não-paramétricos aos níveis de significância (α) de 0,05 e 0,01 na série pluviométrica dos postos, no período de janeiro de 1910 a dezembro de 2016, de modo a observar modificações na tendência de precipitação.

A análise apresentou resultados não significativos para 10 (dez) postos pluviométricos em todos os testes estatísticos; e resultados positivos para 07 (sete) postos pluviométricos ao nível de 0,05 de significância; enquanto que ao nível de 0,01 de significância foram observados resultados positivos em 05 (cinco) postos pluviométricos, como pode ser observado na Tabela 26.

Tabela 26 – Resultados da análise estatística dos postos pluviométricos no aplicativo TREND.

Testes Estatísticos	Não significativos ($\alpha = 0,05$ e $0,01$)	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
Mann-kendall	739025, 839007, 839009, 839010, 839015, 839018, 839034, 840000, 840024 e 940005	839012 e 840003	840015
Spearman's Rho	739025, 839007, 839009, 839010, 839015, 839018, 839034, 840000, 840024 e 940005	839012 e 840003	840015
Linear regression	739025, 839007, 839009, 839010, 839015, 839018, 839034, 840000, 840024 e 940005	839012	840003 e 840015
Cusum	739025, 839007, 839009, 839010, 839015, 839018, 839034, 840000, 840024 e 940005	839012	840003, 840010 e 840015
Cumulative deviation	739025, 839007, 839009, 839010, 839015, 839018, 839034, 840000, 840024 e 940005	840002 e 840010	839012, 840003 e 840015
Worsley likelihood	739025, 839007, 839009, 839010, 839015, 839018, 839034, 840000, 840024 e 940005	740024, 839012, 839035, 840002 e 840010	840003 e 840015
Rank Sum	739025, 839007, 839009, 839010, 839015, 839018, 839034, 840000, 840024 e 940005	-	840003, 840010 e 840015
Student's	739025, 839007, 839009, 839010, 839015, 839018, 839034, 840000, 840024 e 940005	739023	840003, 840010 e 840015

Fonte: A Autora (2020).

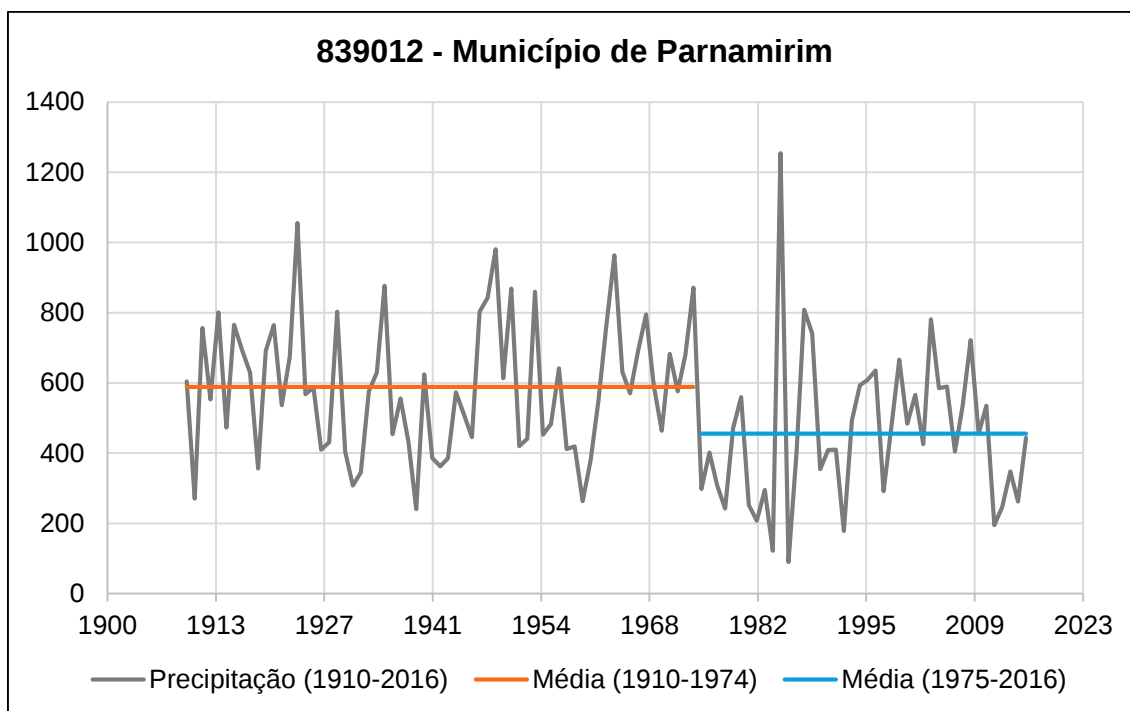
Importante frisar que os postos que apresentaram todos os testes estatísticos do software TREND com resultados não significativos também apresentaram as curvas de dupla massa e a linha de tendência linear sem desvios, o que indica que os postos não possuem mudança de tendência de precipitação para a série histórica analisada, e que ambos os métodos empregados foram eficientes na análise de série pluviométrica.

Os resultados de todos os testes estatísticos aplicados sugerem que houve uma mudança de tendência de comportamento na série pluviométrica de 07 (sete) postos, o que pode implicar em aumento ou redução de precipitação ao longo dos anos. Dentre o total de testes estatísticos apresentados, a *World Meteorological*

Organization (WMO, 2011) recomenda os testes paramétricos *Cumulative Deviation* e *Worsley Likelihood* para detectar mudança ou tendência climatológica, os quais avaliam através da média se há diferença entre dois períodos distintos dentro de uma mesma série de dados.

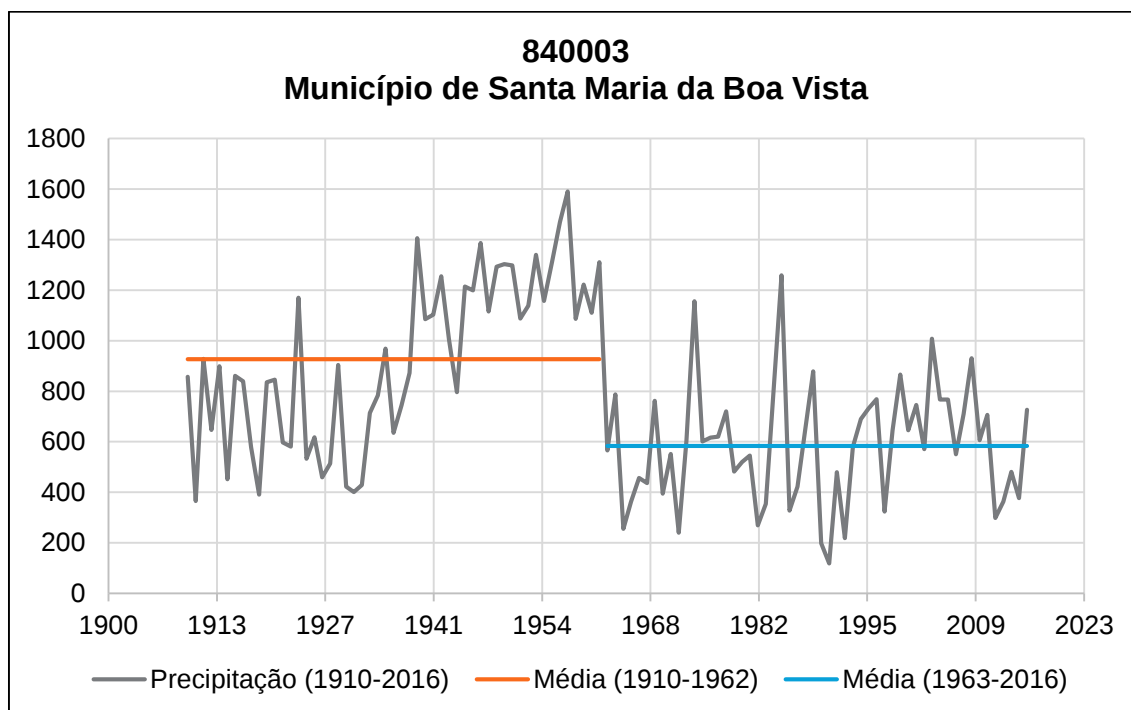
Sendo assim, observando os dados desses testes, com nível de significância de 0,01 nota-se que 03 (três) postos pluviométricos (839012, 840003 e 840015), apresentaram mudança significativa no comportamento da pluviometria, onde a média do período de dados de 1910 a 1974 se apresenta superior ao período de 1974 a 2016 no posto 839012, localizado em Parnamirim; e o período de dados de 1910 a 1962 se mostra maior do que o período de 1962 a 2016 nos postos 840003 e 840015, ambos localizados no município de Santa Maria da Boa Vista (Figura 12 a Figura 14). Isso sugere que a precipitação da região em que esses postos estão localizados está diminuindo ao longo dos anos, o que é preocupante haja vista que estão inseridos na região semiárida do Estado, extremamente vulnerável a processos de desertificação.

Figura 12 – Análise da série pluviométrica do posto 839012 no aplicativo TREND.



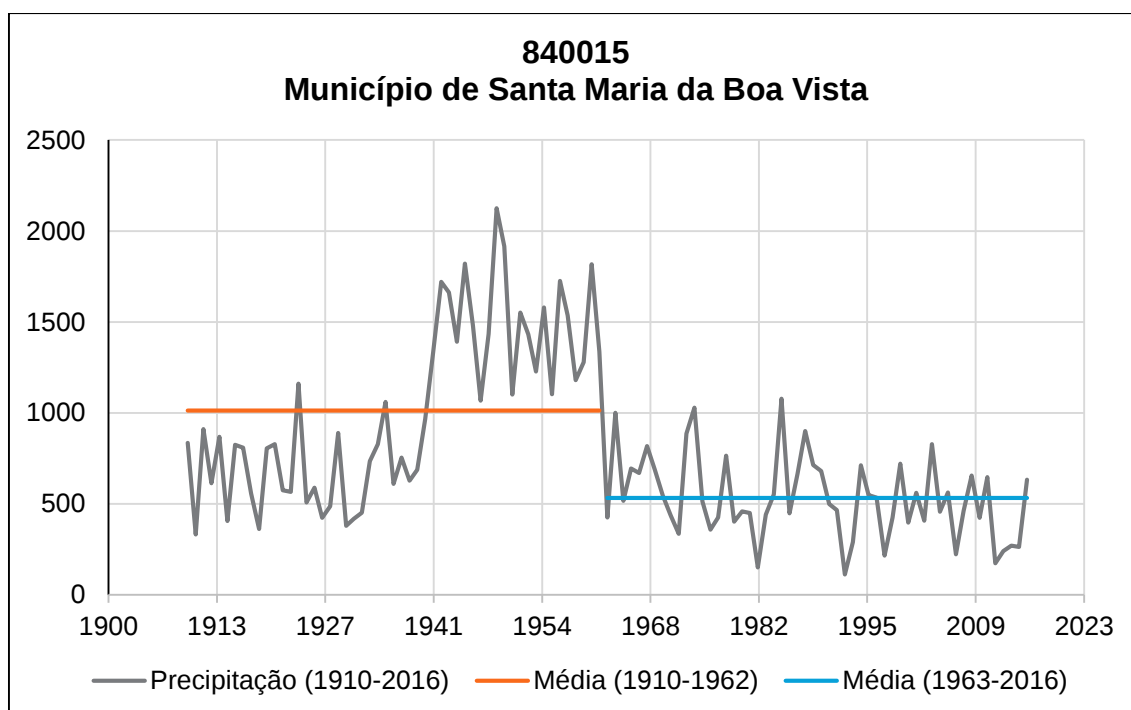
Fonte: A Autora (2020).

Figura 13 – Análise da série pluviométrica do posto 840003 no aplicativo TREND.



Fonte: A Autora (2020).

Figura 14 – Análise da série pluviométrica do posto 840015 no aplicativo TREND.



Fonte: A Autora (2020).

Os resultados acima apresentados estão coerentes com os obtidos por Silva (2013), cujo verificou tendência da diminuição da precipitação total anual

(PRCPTOT), do Índice Simples de Intensidade Diária (SDII) e do número de dias em que a precipitação é maior que 10 mm (R10) e 20 mm (R20) no ano ao longo do território do Estado de Pernambuco. Aliado a isso, o mesmo autor também verificou que os dados de tendência sugeriram a ocorrência de aceleração no processo de aridez das bacias dos rios Ipanema, Brígida e Garças.

5.3 NORMAIS CLIMATOLÓGICAS

Com o intuito de observar as diferenças de comportamento em algumas variáveis climáticas, foram analisados os dados das normais climatológicas padronizadas (1961 a 1990) e provisórias (1991 a 2016), apresentadas respectivamente na Tabela 27 e Tabela 28.

Tabela 27 – Variáveis meteorológicas da Estação 82886 de Cabrobó, segundo as Normais Climatológicas Padronizadas (1961-1990).

Mês	Velocidade do Vento (m/s)	Insolação (horas)	Precipitação		Temperatura do Ar (°C)			UR (%)
			Número de dias	Lâmina (mm)	Média	Mínima	Máxima	
JAN	2,50	241,4	6	87,2	27,0	22,4	32,8	57
FEV	2,21	204,5	6	85,8	26,5	22,2	32,0	61
MAR	2,21	207,2	9	136,1	26,4	22,0	31,9	67
ABR	2,43	199,9	7	104,6	25,6	21,7	31,0	67
MAI	2,68	200,1	4	40,4	24,8	20,8	29,9	67
JUN	3,07	192,1	4	19,4	24,0	19,8	29,1	66
JUL	3,62	196,7	4	13,5	23,7	19,1	29,1	65
AGO	3,70	226,6	1	3,8	24,5	19,4	30,2	59
SET	3,78	244,6	1	4,1	26,0	20,7	32,0	53
OUT	3,22	270,5	1	10,5	27,9	22,1	34,0	48
NOV	3,26	269,7	3	38,8	28,4	22,8	34,1	49
DEZ	2,69	247,1	4	55,4	27,7	22,7	33,7	54
ANO	2,95	2.700,4	50	599,5	26	21,3	31,7	59,4

Fonte: INMET (2009).

Legenda: UR = Umidade Relativa do Ar.

Tabela 28 – Variáveis meteorológicas da Estação 82886 de Cabrobó, segundo as Normais Climatológicas Provisórias (1991-2016).

Mês	Velocidade do Vento (m/s)	Insolação (horas)	Precipitação		Temperatura do Ar (°C)			UR (%)
			Número de dias	Lâmina (mm)	Média	Mínima	Máxima	
JAN	3,5	246,4	8	85,7	28,0	23,2	33,6	56
FEV	3,3	220,6	7	77,4	27,7	23,1	33,3	60
MAR	3,0	241,8	10	110,7	27,5	23,1	32,9	64
ABR	3,4	232,1	7	67,6	27,1	22,8	32,5	64
MAI	3,8	214,5	9	32,4	26,1	22,0	31,4	65
JUN	3,9	200,6	6	8,5	25,0	20,9	30,3	65
JUL	4,7	209,2	7	11,5	24,3	19,9	29,7	63
AGO	5,2	250,2	5	5,3	24,9	19,9	30,6	58
SET	5,4	269,0	2	2,3	26,7	21,0	32,6	51
OUT	4,9	293,6	2	10,7	28,3	22,5	34,3	47
NOV	4,2	275,4	3	28,3	29,1	23,6	34,8	46
DEZ	3,7	262,9	5	50,9	28,9	23,8	34,6	50
ANO	4,1	2.916,2	69	491,2	27,0	22,2	32,5	57,6

Fonte: INMET (2017).

Legenda: UR = Umidade Relativa do Ar.

Os dados demonstram que houve um acréscimo das normais provisórias quando comparadas as normais padronizadas nos parâmetros de velocidade do vento, insolação, número de dias de precipitação e temperatura.

Segundo os dados das normais padronizadas, a velocidade do vento na região fica compreendida entre 2,21 e 3,78 m/s, com uma velocidade anual de 2,95 m/s, enquanto que nas normais provisórias, a velocidade do vento oscila entre 3,0 e 5,4 m/s, com a velocidade anual de 4,1 m/s, o que representa um aumento de 1,1 m/s consistente com a possibilidade de efeito orográfico que vem proporcionando mudanças na climatologia da bacia.

Aliado a isso, o comportamento da insolação nas normais padronizadas variou entre 192,1 a 270,6 horas e uma média anual de 2.700,4 horas, ao passo que as normais provisórias apresentaram uma insolação mínima de 200,6 h e máxima de 293,6 h, com uma insolação anual de 2.916,2 h, o que equivale a um aumento de 215,8 h.

O número de dias de precipitação na bacia, de acordo com as normais padronizadas era de 50 dias por ano, enquanto que nas normais provisórias é de 69, indicando que houve um acréscimo de 19 dias de chuva ao longo do ano na região.

As normais padronizadas indicam que a precipitação acumulada mensal variou entre 3,8 a 136,1 mm, respectivamente nos meses de agosto e março, com uma precipitação acumulada anual de 599,5 mm, ao passo que nas normais provisórias, a precipitação mínima foi de 2,3 mm e máxima de 110,7 mm, nos meses de setembro e março, e precipitação anual de 491,2 mm, sugerindo que houve redução da precipitação acumulada anual em torno de 108,3 mm.

De acordo com os dados das normais padronizadas, a temperatura média do ar é de 26°C, a mínima é de 21,3°C e a máxima de 31,7°C, ao passo que nas normais provisórias, a temperatura média é de 27°C, a mínima é de 22,2°C e a máxima é de 32,5°C, o que representa um acréscimo de 1°C, 0,9°C e 0,8°C, respectivamente nas temperaturas média, mínima e máxima na região da bacia do rio Brígida.

A umidade relativa das normais padronizadas oscila entre 48% e 67%, com uma média anual de 59,4%, enquanto que nas normais provisórias, a umidade relativa do ar varia entre o mínimo de 47%, e máximo de 65%, o que sugere uma redução da umidade relativa por volta de 1,8% na região de estudo.

Os dados acima apresentados corroboram com a hipótese de mudança de tendência na região em escala temporal, haja vista que os dados mais recentes (normais provisórias) estão se apresentando mais elevados quando comparados aos dados mais antigos (normais padronizadas), o que provavelmente se deve a intensificação dos processos de antropização associados à urbanização da região.

5.4 ÍNDICES DE SECA

Índice de Anomalia de Chuva (RAI)

A partir da análise dos dados da RAI (Tabela 29), verificou-se que as categorias R0, R1 e R2, que se referem às classes Extremamente Úmido, Muito Úmido e Úmido reunidas representam no período de 1961-1990 cerca de 39% dos registros. No intervalo de 1991-2016 foram verificados 33% de registros para as mesmas classes, ou seja, houve uma redução de -16,9% nos registros das categorias R0, R1 e R2 referente a valores classificados como período úmido.

Além disso, as categorias R3 (Seco), R4 (Muito Seco) e R5 (Extremamente Seco) reunidas totalizam cerca de 61% dos registros no período de 1961-1990, enquanto que no intervalo de 1991-2016, foram anotados cerca de 67% dos

registros, indicando que houve um aumento de 10,9% dos registros classificados como período seco.

Tabela 29 – RAI para as 38 estações pluviométricas da bacia do rio Brígida no período de 1961 a 2016.

Classes	1961-1990		1991-2016		Taxa de Crescimento (%)
	Nº	(%)	Nº	(%)	
R0	725	5,30	230	1,94	-63,4
R1	1288	9,42	707	5,96	-36,7
R2	3358	24,55	2933	24,74	+0,8
R3	3346	24,46	4490	37,87	+54,8
R4	4952	36,20	3484	29,39	-18,8
R5	10	0,07	12	0,10	+38,5

Fonte: A Autora (2020).

R0: Extremamente úmido, R1: Muito Úmido, R2: Úmido, R3: Seco, R4: Muito Seco e R5: Extremamente Seco.

Os resultados sugerem que o período úmido (R0, R1 e R2 juntos) para os 13 municípios no território da bacia reduziram nos últimos anos (1991-2016), o que em longo prazo poderá ocasionar diversos problemas relacionados aos recursos hídricos, como baixa disponibilidade de água para abastecimento, assim como, o aumento da susceptibilidade aos processos de desertificação.

De acordo com a análise de tendência temporal, não há distinção para os valores do RAI no período de 1961-1990 quando comparado ao intervalo de 1991-2016 para a maioria dos postos pluviométricos na bacia, haja vista que em média 77% deles apresentaram resultados estatisticamente Não Significativos (NS), conforme apresentado na Tabela 30.

De maneira geral, os postos que apresentaram diferença estatística significativa no valor de RAI tiveram os dados da média de 1961-1990 superior ao de 1991-2016, sugerindo que nesse período houve um maior quantitativo de precipitação, pois valores maiores de RAI são classificados na categoria úmida.

Tabela 30 – Análise de tendência temporal do RAI no aplicativo TREND no período de 1961 a 1990 e 1991 a 2016 para os 38 postos pluviométricos localizados na bacia do rio Brígida.

Testes	NS	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
Mann-kendall	87%	3%	11%	0%
Spearman's Rho	87%	0%	11%	3%
Linear regression	71%	11%	13%	5%
Cumulative deviation	71%	13%	13%	3%
Worsley likelihood	79%	8%	8%	5%
Rank Sum	76%	11%	8%	5%
Student's ¹	71%	11%	13%	5%

Fonte: A Autora (2020).

NS = Não significativo para $\alpha = 0,05$ e $0,01$.

¹ Todos os postos que apresentaram diferença significativa tiveram a média de 1961-1990 maior que 1991-2016, a única exceção foi o posto 739031.

O único posto pluviométrico que apresentou comportamento inverso para a análise de tendência climática do RAI foi o 739031 situado no município de Serrita/PE, o que provavelmente se deve a algum efeito orográfico na bacia, haja vista que se encontra localizado na parte de altitude mais elevada, que corresponde a Chapada do Araripe, conforme descrito no item 3.5.

A orografia é um importante fator atuante na dinâmica dos atributos constituintes do clima, de forma a intensificar ou reduzir os totais de pluviosidade, conforme a posição a barlavento ou a sota-vento (Candido e Nunes, 2008).

De acordo com Ganem (2017), regiões elevadas como a Chapada do Araripe, com altitudes superiores a 900 metros, onde a bacia do rio Brígida está situada, recebe chuvas orográficas, enquanto que depressões como a Depressão Sertaneja com altitudes abaixo de 500 metros recebem sombra de chuva.

Diversos autores, tais como Conti (2005), Fachine e Galvêncio (2014) e Dantas *et al.* (2018) observaram a ocorrência de efeito orográfico na Chapada do Araripe e na bacia do rio Brígida.

Felix (2015), ao estudar o Índice de Anomalia de Chuva (RAI) para identificar padrões temporais da chuva na bacia hidrográfica do rio Espinharas/PB, situada no semiárido Nordeste, com características semelhantes a bacia do rio Brígida, constatou que o total de precipitação ao longo dos anos diminuiu significativamente.

Gross e Cassol (2015) verificaram que a frequência do Índice de Anomalia de Chuva (RAI) negativos foi maior no setor Sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, na última década do período de análise de 1991 a 2012, ou seja, houve uma

redução de períodos úmidos e aumento dos registros nas categorias secas, de forma semelhante ao ocorrido na bacia do rio Brígida.

Eshet *et al.* (2016) identificaram a ocorrência de anomalias extremas de ordem negativa, na precipitação anual, em 42% dos anos analisados, no período de 1979 a 2011 na estação de Setema, no Sudoeste da Etiópia, que possui características similares ao semiárido do Nordeste do Brasil, onde a área de estudo do presente artigo encontra-se situada. Aliado a isso, esses autores também constataram que há uma tendência de diminuição da precipitação, ou seja, os registros indicativos de categoria seca estão mais frequentes do que os períodos úmidos, igualmente ao ocorrido nos municípios da bacia do rio Brígida.

Costa e Rodrigues (2017), ao analisarem a variação espaço-temporal na bacia do rio Salgado no Ceará, por meio do Índice de Anomalia de Chuva (RAI), verificaram que a série histórica de 1974 a 2015 apresentou anos mais secos do que chuvosos. Ou seja, esses autores encontraram resultados parecidos aos observados na bacia do rio Brígida, no período de 1961-2016, onde detectou-se um maior quantitativo de registros das classes de períodos secos.

Lins *et al.* (2017), mediante a utilização do RAI conseguiram identificar a ocorrência dos maiores eventos extremos de precipitação, ou seja, de anomalias negativas, nos anos de 1989 e 1998 no município de Serra Talhada em Pernambuco.

Os resultados supracitados indicam que a situação de maior ocorrência de períodos secos não é isolada em uma única região, de um dado país, e que precisa ser monitorada constantemente pelos órgãos de gestão dos recursos hídricos, sobretudo, na região semiárida. Tal premissa se baseia no fato de que nas últimas décadas, os dados demonstraram que as secas estão mais frequentes, e isso pode interferir diretamente na disponibilidade hídrica, que por sua vez poderá gerar conflitos pelo uso da água.

Além disso, todos os resultados apresentados sugerem que a utilização do Índice de Anomalia de Chuva (RAI) para a identificação de períodos úmidos e secos, assim como, avaliação da tendência de diminuição da precipitação é extremamente confiável. E o RAI pode se tornar uma ferramenta crucial não somente no monitoramento da disponibilidade hídrica, mas também na evolução da susceptibilidade ao processo de desertificação, e da influência aos eventos

relacionados as mudanças climáticas, sobretudo em bacias hidrográficas localizadas em regiões semiáridas.

Índice de Precipitação Padronizado (SPI)

Os resultados do SPI (Tabela 31) indicam que as categorias referentes ao período úmido, tais como S0 (Extremamente úmido), S1 (Muito úmido) e S2 (Moderadamente Úmido) mostraram uma redução no número de registros no intervalo de 1991-2016 (25,15%) quando comparado ao período de 1961-1990 (1,27%). Esses resultados sugerem um decréscimo no número de valores classificados como úmido nos últimos anos da série histórica analisada de cerca de -94,9%.

As classes S3 (Próximo ao normal), S4 (Seca Moderada), S5 (Seca severa) e S6 (Seca extrema) reunidas foram de 74,85% no intervalo de 1961-1990 para 98,73% em 1991-2016, sugerindo uma intensificação dos períodos secos de aproximadamente 31,9%.

Tabela 31 – SPI para as 38 estações pluviométricas da bacia do rio Brígida no período de 1961 a 2016.

Classes	1961-1990		1991-2016		Taxa de Crescimento (%)
	Nº	(%)	Nº	(%)	
S0	303	2,55	0	0,00	-100,0
S1	835	7,02	26	0,22	-96,9
S2	1853	15,58	125	1,05	-93,2
S3	8148	68,51	8746	73,77	+7,7
S4	456	3,83	900	7,59	+98,0
S5	217	1,82	1025	8,65	+373,9
S6	82	0,69	1034	8,72	+1165,0

Fonte: A Autora (2020).

S0: Extremamente úmido; S1: Muito úmido; S2: Moderadamente úmido; S3: Próximo ao normal; S4: Seca moderada; S5: Seca severa e S6: Seca extrema.

Esse comportamento também foi observado na análise de tendência temporal (Tabela 32), onde houve diferença estatística significativa na média do período de 1961-1990 quando comparado ao de 1991-2016 em grande parte dos postos pluviométricos da bacia ao nível de 0,01 de significância.

Tabela 32 – Análise de tendência temporal do SPI no aplicativo TREND no período de 1961 a 1990 e 1991 a 2016 para os 38 postos pluviométricos localizados na bacia do rio Brígida.

Testes	NS	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
Mann-kendall	21%	8%	13%	58%
Spearman's Rho	21%	11%	16%	53%
Linear regression	16%	3%	13%	68%
Cumulative deviation	8%	13%	16%	63%
Worsley likelihood	0%	0%	0%	100%
Rank Sum	16%	5%	26%	53%
Student's ¹	5%	18%	18%	58%

Fonte: A Autora (2020).

NS = Não significativo para $\alpha = 0,05$ e $0,01$.

¹ Todos os postos que apresentaram diferença significativa obtiveram a média de 1961-1990 maior que 1991-2016.

A análise de tendência temporal do SPI indica que os maiores valores, ou seja, que correspondem a classificação de período úmido ocorrem em maior quantidade entre 1961-1990 do que nos anos de 1991 a 2016, o que implica dizer que houve uma redução nos quantitativos de chuva, e, conseqüentemente de períodos úmidos na região da bacia do rio Brígida.

Trabalhos similares como o de Guenang e Kamga (2014) concluíram que nas séries temporais de 55 anos do SPI, episódios de secas severas e extremas são identificados em muitas estações durante o período analisado, e que as ocorrências de seca moderada e severa são intra-anuais em escalas de tempo curtas e interanuais por longos períodos na região semiárida de Camarões. Esses resultados foram semelhantes aos observados no presente estudo na bacia do rio Brígida, onde verificou-se que as categorias Seca moderada (S4), Seca severa (S5) e Seca extrema (S6) se intensificaram nos últimos anos da série analisada.

Sampaio e Pinto (2018), ao usarem o SPI para determinar a severidade da seca na região, verificaram que as estiagens nos anos de 2012 a 2013 e 2016 a 2017 foram eventos extremos que colaboraram para a redução da disponibilidade hídrica do reservatório Serra Azul. Os resultados obtidos por esses autores foram parecidos aos da bacia do rio Brígida, onde também se verificou que os períodos secos estão se intensificando, o que pode trazer problemas de disponibilidade hídrica da região, sobretudo no tocante ao nível de acumulação dos reservatórios usados para abastecimento humano.

Faro *et al.* (2019) ao estimarem o SPI para avaliar o estresse hídrico no Sistema Cantareira, um dos principais sistemas produtores de água da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), no período de 1983 a 2018, verificaram que a partir do ano 2000, apesar de um período atenuado entre 2009 e 2011, a tendência de crescimento dos déficits do sistema começou a ocorrer mais intensamente, com um gradiente maior, considerando tanto o volume quanto a magnitude da duração do evento de seca. Ou seja, esses resultados estão coerentes com os observados na bacia do rio Brígida, em que se identificou o aumento da magnitude das secas no intervalo de 1991-2016 quando comparado ao período de 1961-1990.

Pramudya *et al.* (2019), a partir dos resultados do SPI, concluíram que a maior parte da Indonésia apresentou secas severas e extremas no período de 1991-2006, e que a Ilha de Bornéu e Papua Ocidental são as ilhas que detiveram a seca mais extrema durante as estações secas analisadas em toda a série histórica. Resultados similares aos obtidos por esses autores foram identificados na bacia do rio Brígida, onde observou-se a ocorrência de intensificação das secas moderada, severa e extrema nos anos mais recentes da série estudada.

Koudahe *et al.* (2017), usando o SPI na escala de tempo de 12 meses, observaram que há uma tendência crescente de períodos secos, no período de 1970 a 2014, no Sul do Togo, o que é prejudicial à agricultura de sequeiro praticada por cerca de 90% dos agricultores da região. Essa tendência crescente de períodos secos também foi observada no presente estudo na bacia do rio Brígida.

Braga *et al.* (2015) verificaram que os resultados da análise dos SPI, nas escalas temporais de 12, 18, 24 e 36 meses, na bacia do rio Piranhas-Açu indicaram que as secas ocorridas entre os anos de 1980 e 1983, 1993, 1998 e 1999 e 2012 a 2014 foram as que atingiram as categorias mais severas, em grande parte da bacia. Além disso, os mesmos autores concluíram que o SPI pode ser uma boa ferramenta para o gerenciamento dos recursos hídricos.

Todos os resultados acima apresentados indicam que a intensificação das categorias de secas não é uma condição isolada na bacia do rio Brígida, mas que também ocorre em outras regiões semiáridas do mundo, o que sugere o aumento da ocorrência de eventos hidrológicos extremos como secas. Esses fenômenos interferem diretamente na disponibilidade hídrica, e, portanto, precisam ser monitorados pelos órgãos gestores para facilitar a implantação de medidas que

gerenciem os recursos hídricos, sobretudo, em períodos de secas severas e extremas.

Além disso, a ocorrência reiterada de secas de maior intensidade pode acelerar o processo de desertificação, que em longo prazo pode inviabilizar o uso do solo para cultivos agrícolas, interferindo na agricultura de subsistência e consequentemente na economia local. Nesse sentido, uma das ferramentas que pode ser empregada é o SPI, que indica a severidade das secas e pode ser facilmente empregado, haja vista que só utiliza precipitação como dados de entrada, se tornando uma vantagem no gerenciamento dos recursos hídricos.

Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)

Segundo os resultados de PDSI (Tabela 33), as classes P1 (Extremamente úmido), P2 (Muito úmido), P3 (Moderadamente úmido), P4 (Ligeiramente úmido), P5 (Período úmido incipiente) e P6 (Próximo ao normal) reunidas representam cerca de 49,74% dos registros no período de 1961-1990, enquanto que no intervalo de 1991-2016 esses quantitativos reduziram para 30,79%, sugerindo que houve uma redução de valores categorizados como úmidos, equivalente a -38,1%.

Aliado a isso, as categorias P7 - Seca incipiente, P8 - Seca suave, P9 - Seca moderada, P10 - Seca severa e P11 - Seca extrema juntas contemplam 50,26% dos registros, no período de 1961-1990, enquanto que no intervalo de 1991-2016 esses dados aumentaram para 69,21%, indicando que houve um crescimento de registro de seca correspondente a 37,7%.

Tabela 33 – PDSI para as 38 estações pluviométricas da bacia do rio Brígida no período de 1961 a 2016.

Classes	1961-1990		1991-2016		Taxa de Crescimento (%)
	Nº	(%)	Nº	(%)	
P1	6475	47,33	3315	27,96	-40,9
P2	27	0,20	17	0,14	-27,4
P3	28	0,20	26	0,22	+7,1
P4	20	0,15	23	0,19	+32,7
P5	9	0,07	18	0,15	+130,8
P6	246	1,80	251	2,12	+17,7
P7	22	0,16	22	0,19	+15,4
P8	42	0,31	62	0,52	+70,3
P9	64	0,47	56	0,47	+1,0
P10	68	0,50	71	0,60	+20,5
P11	6679	48,82	7995	67,43	+38,1

Fonte: A Autora (2020).

P1: Extremamente Úmido, P2: Muito Úmido, P3: Moderadamente Úmido, P4: Ligeiramente Úmido, P5: Período Úmido Incipiente, P6: Próximo ao Normal, P7: Seca Incipiente, P8: Seca Suave, P9: Seca Moderada, P10: Seca Severa, P11: Seca Extrema.

O comportamento de diminuição de dados úmidos e crescimento de registros de seca no intervalo de 1991-2016 quando comparado ao período de 1961-1990 também é verificado nos 13 municípios que estão inseridos no território da bacia do rio Brígida, sugerindo que não é uma condição isolada, do ponto de vista geográfico.

Na análise de tendência climática (Tabela 34), os postos pluviométricos que obtiveram diferença estatística significativa, apresentaram a média do PDSI de 1961-1990 superior a de 1991-2016, indicando que houve uma diminuição no quantitativo de registros relacionados a categoria úmida no território da bacia do rio Brígida.

Tabela 34 – Análise de tendência temporal do PDSI no aplicativo TREND no período de 1961 a 1990 e 1991 a 2016 para os 38 postos pluviométricos localizados na bacia do rio Brígida.

Testes	NS	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
Mann-kendall	18%	13%	39%	29%
Spearman's Rho	21%	11%	42%	26%
Linear regression	13%	5%	34%	47%
Cumulative deviation	24%	8%	37%	32%
Worsley likelihood	3%	5%	24%	68%
Rank Sum	13%	21%	29%	37%
Student's ¹	3%	8%	34%	55%

Fonte: A Autora (2020).

NS = Não significativo para $\alpha = 0,05$ e $0,01$.

¹ Todos os postos que apresentaram diferença significativa obtiveram a média de 1961-1990 maior que 1991-2016.

Resultados semelhantes foram obtidos por Rodrigues *et al.* (2018), através do PDSI, os quais concluíram que a seca continua sendo um fenômeno recorrente na bacia do rio Pajeú, localizada em Pernambuco, onde nos últimos 30 anos a seca se apresentou de maneira mais severa, e a alteração do regime pluviométrico associado ao aumento da temperatura do ar podem explicar a ocorrência desses eventos.

Na bacia do rio Brígida, assim como, em Rodrigues *et al.* (2018), observou-se que as secas estão se tornando mais intensas nos anos recentes (1991-2016) e que os períodos úmidos vêm diminuindo ao longo do período estudado, quando comparado aos anos mais antigos (1961-1990) da série histórica analisada.

Silveira *et al.* (2017) ao estimarem o índice PDSI para a cidade de Pelotas no Rio Grande do Sul, para o período de 1980 a 2013 identificaram alguns valores de seca severa e extrema, sendo observado que a maioria dos períodos correspondem a seca moderada, e alguns picos de seca severa principalmente nos períodos de 2004 a 2010. De forma análoga a bacia do rio Brígida também se verificou a intensificação das secas na escala temporal analisada.

Rossato *et al.* (2017), por meio do PDSI, concluíram que o Nordeste tem níveis mais intensos de seca, quando comparado as demais regiões do Brasil, no período de 2000 a 2015. Além disso, a análise de projeção climática usando o *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) apresentou para o futuro, mediante resultados da simulação para o período de 2071-2100, riscos de secas

severas no semiárido Nordeste, com reduções pluviométricas de até 40% e aumento de dias secos consecutivos.

Esses dados estão coerentes com os observados na bacia do rio Brígida, onde detectou-se a redução dos períodos úmidos associada a intensificação das secas nos últimos anos da série histórica estudada. Esse comportamento é extremamente preocupante, sobretudo em médio e longo prazo, pois pode incrementar o efeito de processos relacionados a mudanças climáticas, tais como, a desertificação, que afeta a disponibilidade hídrica e a produtividade agrícola do semiárido.

Nesse contexto, o uso do PDSI se torna uma ferramenta crucial ao monitoramento de eventos hidrológicos extremos, tais como, secas e estiagens, pois verifica se estão se intensificando na escala temporal. Além disso, o PDSI pode ser usado para o acompanhamento da susceptibilidade a desertificação, pois um de seus dados de entrada são os elementos do balanço hídrico, que envolve recarga, escoamento superficial, umidade do solo, fatores estes extremamente influenciáveis pelos fatores climáticos.

5.5 ÍNDICES DE ARIDEZ

Índice de Aridez de Martonne (MIA)

Com relação ao MIA, verificou-se que as categorias M0 (umidade acima do normal), M1 (úmido) e M2 (umidade abaixo do normal) apresentaram cerca de 30,16% dos registros, no período de 1961-1990. No intervalo de 1991-2016, essas mesmas categorias reduziram para 25,50%, o que corresponde a um decréscimo de -15,5%.

Os dados de MIA estimados (Tabela 35) também evidenciaram que as classes M3 (semiárido), M4 (árido) e M5 (extremamente árido) obtiveram 69,84% dos registros no período de 1961-1990, enquanto que no intervalo de 1991-2016 passaram para 74,50%, representando um crescimento de 6,7%.

Os resultados sugerem que na bacia do rio Brígida houve uma redução dos registros classificados como úmidos (M0, M1 e M2) e crescimento dos valores categorizados como árido (M3, M4 e M5), no período de 1991-2016 quando comparado ao intervalo de 1961-1990. Esse comportamento de elevação da aridez foi verificado em todos os 13 municípios inseridos no território da bacia do rio

Brígida, sugerindo que não se trata de condição isolada, e que em médio e longo prazo pode favorecer a desertificação dos solos, trazendo prejuízos socioeconômicos a população local.

Tabela 35 – MIA para as 38 estações pluviométricas da bacia do rio Brígida no período de 1961 a 2016.

Classes	1961-1990		1991-2016		Taxa de Crescimento (%)
	Nº	(%)	Nº	(%)	
M0	916	6,70	354	2,99	-55,4
M1	1918	14,02	1588	13,39	-4,5
M2	1292	9,44	1081	9,12	-3,5
M3	795	5,81	706	5,95	+2,5
M4	2859	20,90	2478	20,90	+0,01
M5	5900	43,13	5649	47,65	+10,5

Fonte: A Autora (2020).

M0: Umidade Acima do Normal, M1: Úmido, M2: Umidade Abaixo do Normal, M3: Semiárido, M4: Árido e M5: Extremamente Árido.

Os resultados da análise de tendência climática do MIA (Tabela 36) demonstram que há uma diferença estatística significativa em alguns postos pluviométricos da bacia, sugerindo que os dados do período de 1961-1990 são mais amenos em termos de aridez do que os de 1991-2016, o que implica dizer que a aridez está evoluindo na região, e pode aumentar a susceptibilidade a desertificação. Principalmente porque a bacia está totalmente inserida na região semiárida do Brasil, caracterizada por baixos índices pluviométricos, alta taxa de evaporação e distribuição irregular de chuva.

Tabela 36 – Análise de tendência temporal do MIA no aplicativo TREND no período de 1961 a 1990 e 1991 a 2016 para os 38 postos pluviométricos localizados na bacia do rio Brígida.

Testes	NS	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
Mann-kendall	42%	24%	21%	13%
Spearman's Rho	39%	29%	24%	8%
Linear regression	32%	21%	34%	13%
Cumulative deviation	55%	16%	21%	8%
Worsley likelihood	34%	47%	11%	8%
Rank Sum	53%	29%	13%	5%
Student's ¹	26%	26%	39%	8%

Fonte: A Autora (2020).

NS = Não significativo para $\alpha = 0,05$ e $0,01$.

¹ Todos os postos que apresentaram diferença significativa obtiveram a média de 1961-1990 maior que 1991-2016.

Esse comportamento também foi observado por Lopes e Leal (2015), cujo verificaram um aumento no Índice de Aridez de Martonne (MIA) para o período de 1961 a 2015, no Nordeste brasileiro, nos municípios de Lençóis, Bom Jesus da Lapa, Cabrobó e Garanhuns, tornando-os mais susceptíveis a desertificação.

Chowdhury (2018) utilizando o Índice de Aridez de Martonne (MIA) em Bangladesh, em dois períodos distintos, de 1991-2000 e 2001-2010, assim como, o presente estudo na bacia do rio Brígida, também verificou que a severidade e a distribuição da aridez possuem um padrão crescente ao longo dos últimos anos.

Moral *et al.* (2017), ao empregarem o Índice de Aridez de Martonne (MIA), no período de 1951 a 2010, verificaram um aumento da aridez, sendo detectada diferença estatística significativa a partir do final da década de 1970, em comparação aos demais anos analisados no Sudoeste da Espanha.

Dabbaghi e Manjari (2017), ao utilizarem o Índice de Aridez de Martonne (MIA), na bacia de Razan-Qhahavand, situada no Irã verificaram que a aridez na planície se torna crescente ao longo dos anos (1983-2013), provavelmente devido ao aquecimento global, o que colabora com o processo de desertificação, vindo a se tornar um perigo para as pessoas que vivem nesta área. Esses autores obtiveram resultados semelhantes aos observados na bacia do rio Brígida onde notou-se a intensificação da aridez ao longo da série histórica analisada, indicando um aumento da susceptibilidade à desertificação na região.

Muhire e Ahmed (2016), por meio do Índice de Aridez de Martonne (MIA) verificaram que houve um aumento da aridez na região das terras altas e na região

ocidental em Ruanda, no período de 1961-1992, e que essas áreas são mais afetadas por secas, redução da disponibilidade hídrica e consequentemente perda da produção agrícola. Situação semelhante a observada na bacia do rio Brígida, onde obteve-se um incremento da aridez e diminuição de períodos úmidos, que consequentemente podem afetar a disponibilidade hídrica local.

As pesquisas acima apresentadas demonstram como as regiões semiáridas em diversas partes do mundo estão sofrendo um incremento da aridez nos últimos anos e consequentemente uma redução de períodos úmidos que afetam diretamente a disponibilidade hídrica. Aliado a isso, a evolução da aridez torna os territórios mais susceptíveis ao processo de desertificação, que pode ser acelerado em decorrência de mudanças climáticas de ordem local e/ou global.

Nesse sentido, a utilização de índices para a medição da evolução da aridez, a exemplo do MIA são cruciais pois podem fornecer elementos para tomada de decisão pelos órgãos fiscalizadores. Além de permitir que projetos relacionados a desertificação sejam implantados em tempo hábil para que esse processo não se instale de modo definitivo no território da bacia hidrográfica, sobretudo as localizadas em regiões semiáridas, como a bacia do rio Brígida.

Principalmente porque segundo pesquisa desenvolvida pela Fiocruz (2017), através do uso do software SisVuClima, o Estado de Pernambuco poderá apresentar dias mais secos e mais quentes a partir de 2041. Segundo as análises feitas, o Sertão Pernambucano poderá ter um aumento de até 3,7°C na temperatura, como é o caso do município de Araripina. Além disso, a região do São Francisco, onde a bacia do rio Brígida está situada seria a mais afetada pela redução da precipitação, chegando a alcançar um volume de -39%, no município de Petrolândia, por exemplo. E como os fatores de precipitação e temperatura influenciam diretamente a aridez, esta poderia se intensificar ainda mais na região da bacia de estudo.

Índice de Aridez de Thornthwaite (AI)

Os dados do AI (Tabela 37) indicam que as categorias Pouca ou nenhuma deficiência hídrica (A0) e Moderada deficiência hídrica (A1) juntas obtiveram 68,25% dos registros, no período de 1961-1990, enquanto que nos anos de 1991-2016, essas classes passaram para 73,90%, ou seja, tiveram um crescimento de 15,2%. A classe A2 (Grande deficiência hídrica) obteve 31,75% e 26,10% dos registros

respectivamente para os anos de 1961-1990 e de 1991-2016, indicando que houve uma queda de -17,8% nessa categoria.

Contudo, apesar de haver um decréscimo na categoria A2, que representa uma grande deficiência hídrica, houve também o aumento dos registros nas classes A0 e A1, sugerindo que está havendo uma intensificação da aridez na região da bacia do rio Brígida nos últimos anos analisados.

Indicando que medidas relacionadas a gestão dos recursos hídricos devem ser tomadas o mais breve possível, para evitar que a bacia do rio Brígida se torne susceptível ao processo de desertificação.

Tabela 37 – AI para as 38 estações pluviométricas da bacia do rio Brígida no período de 1961 a 2016.

Classes	1961-1990		1991-2016		Taxa de Crescimento (%)
	Nº	(%)	Nº	(%)	
A0	7295	53,33	6880	58,03	+8,8
A1	2042	14,93	1882	15,87	+6,3
A2	4343	31,75	3094	26,10	-17,8

Fonte: A Autora (2020).

A0: Pouca ou Nenhuma Deficiência Hídrica, A1: Moderada Deficiência Hídrica e A2: Grande Deficiência Hídrica.

A análise de tendência climática do AI (Tabela 38) indicou que em média, aproximadamente 28% dos postos pluviométricos apresentaram diferença estatística ao nível de 0,1 de significância, inferindo que a média do período de 1961-1990 foi superior à de 1991-2016. Isso indica que no período de 1961-1990 a aridez foi menos intensa, quando comparada aos anos de 1991-2016, e que nesses últimos anos a aridez vem crescendo na área de estudo. Esse comportamento se deve provavelmente a redução da precipitação e elevação da evapotranspiração na região da bacia do rio Brígida.

Tabela 38 – Análise de tendência temporal do AI no aplicativo TREND no período de 1961 a 1990 e 1991 a 2016 para os 38 postos pluviométricos localizados na bacia do rio Brígida.

Tests	NS	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
Mann-kendall	47%	29%	21%	3%
Spearman's Rho	47%	29%	18%	5%
Linear regression	39%	29%	26%	5%
Cumulative deviation	58%	18%	16%	8%
Worsley likelihood	61%	32%	5%	3%
Rank Sum	50%	24%	21%	5%
Student's ¹	16%	34%	45%	5%

Fonte: A Autora (2020).

NS = Não significativo para $\alpha = 0,05$ e $0,01$.

¹ Todos os postos que apresentaram diferença significativa obtiveram a média de 1961-1990 maior que 1991-2016.

Tal premissa se baseia nos resultados de Sá *et al.* (2010), que mediante simulação, verificou que no cenário otimista há um aumento expressivo na bacia do rio São Francisco, para a evapotranspiração potencial, que ficará entre 1.490 a 1.590 mm/ano, e no cenário pessimista ficará entre 1.590 e 1.690 mm/ano, ambos em 2030, sendo observada também um aumento para os anos de 2050 e 2070 com a mesma tendência.

Aliado a isso, Fiocruz (2017) verificou que no Estado de Pernambuco, a região da bacia do rio São Francisco será a mais afetada pela redução da precipitação, e como a bacia do rio Brígida está situada no Sub-Médio São Francisco será fortemente influenciada.

Resultados similares foram encontrados por Souza *et al.* (2010), em que o índice de aridez (AI) apresentou um núcleo de aumento estatisticamente significativo, ao nível de 5% de probabilidade, na microrregião de Araripina, com acréscimo máximo anual da ordem de 1,65% no município de Exú, no estado de Pernambuco.

Santos *et al.* (2018), ao analisarem os dados da Precipitação Média Anual (P), Evapotranspiração Potencial (ETP) e Índice de Aridez (AI) na bacia hidrográfica do rio Piracuruca (PI/CE), observaram que os mais altos níveis de AI se concentraram nas áreas que obtiveram os menores totais de precipitação e os maiores valores de ETP. Da mesma forma, acontece na bacia do rio Brígida, onde detectou-se que há uma redução da precipitação e um incremento da aridez no período de 1991-2016 através da análise de tendência climática.

Jesus *et al.* (2019), ao aplicarem o Índice de Aridez de Thornthwaite (AI) no semiárido do estado de Sergipe, verificaram os maiores valores de aridez (0,09) em Canindé de São Francisco e Poço Redondo, e, conseqüentemente, maior risco à desertificação nesses municípios. Ou seja, esses autores verificaram situação análoga à ocorrida na bacia do rio Brígida, onde obteve-se crescimento das categorias A0 e A1 ao longo dos anos, que por consequência pode propiciar a desertificação.

Ahmed *et al.* (2019), ao calcular o Índice de Aridez de Thornthwaite (AI), identificaram uma crescente tendência, no período de 1901-2016, nos valores de aridez no Sudoeste do Paquistão, e observaram alterações estatísticas significativas na precipitação e na aridez nos anos entre 1971 e 1980 em relação aos demais anos, assim como, no rio Brígida no período de 1991-2016 na análise de tendência climática.

Gao *et al.* (2015), com base nos resultados do Índice de Aridez de Thornthwaite (AI), verificaram que metade das estações localizadas no Planalto Tibetano Oriental apresentaram redução de precipitação, ou seja, estão se tornando mais áridas, embora não estatisticamente, nas últimas três décadas. Ainda segundo esses autores, o aumento nos valores de aridez está estatisticamente correlacionado com os padrões de mudança de precipitação, duração do sol e faixa de temperatura diurna.

As pesquisas acima sugerem que de modo geral está ocorrendo uma diminuição de precipitação e também uma elevação na aridez, nos últimos anos, em diversas partes do mundo, não somente no semiárido do Nordeste brasileiro, e que essas alterações podem estar relacionadas aos efeitos das mudanças climáticas.

Esses resultados são extremamente preocupantes, pois com a elevação do AI ocorre o incremento da deficiência hídrica, o que requer investimentos quanto a infraestrutura de saneamento nos tocantes ao uso consciente da água, reuso e aproveitamento, de modo a minimizar os déficits no abastecimento humano.

Diante disso, o acompanhamento da aridez, por meio de índices, a exemplo do AI se torna uma ferramenta eficaz e que pode ser facilmente aplicada em diversas regiões do planeta de maneira confiável, sobretudo para o monitoramento da susceptibilidade a desertificação, que traz imensos prejuízos a produtividade agrícola local.

Índice de Aridez de Áreas Suscetíveis a Desertificação (AI_{ASD})

Os valores de AI_{ASD} (Tabela 39) demonstraram que a zona Subúmida Seca (AI4) e Subúmida Úmida (AI5) reunidas detêm cerca de 21,88% dos registros, no período de 1961-1990. No intervalo de 1991-2016 esses registros passaram para 18,09%. Essas alterações nos registros, no período de 1991-2016 quando comparado ao intervalo de 1961-1990 indicam que houve um decréscimo de 17,3% nas zonas úmidas na bacia do rio Brígida.

Aliado a isso, a categoria AI1 obteve um crescimento de 8,1% nos registros quando comparado os dados de 1991-2016 aos de 1961-1990, o que é extremamente preocupante, pois essa categoria possui a maior parte dos registros de AI_{ASD} da bacia, e se tornando crescente nos últimos anos da série histórica, sugere uma evolução da região a susceptibilidade a desertificação.

Tabela 39 – AI_{ASD} para as 38 estações pluviométricas da bacia do rio Brígida no período de 1961 a 2016.

Classes	1961-1990		1991-2016		Taxa de Crescimento (%)
	Nº	(%)	Nº	(%)	
AI1	4841	35,39	4534	38,24	+8,1
AI2	3028	22,13	2876	24,26	+9,6
AI3	2818	20,60	2301	19,41	-5,8
AI4	775	5,67	718	6,06	+6,9
AI5	2218	16,21	1427	12,04	-25,8

Fonte: A Autora (2020).

AI1: Zona Hiper-árida, AI2: Zona Árida, AI3: Zona Semiárida, AI4: Zona Subúmida Seca e AI5: Zona Subúmida Úmida.

Esse comportamento também foi observado na análise de tendência climática (Tabela 40), onde verificou-se que em média, cerca de 32% dos postos pluviométricos da bacia apresentaram diferença estatística ao nível de 0,01 de significância no Teste Student's, indicando que os valores de AI_{ASD} no período de 1961-1990 são mais úmidos, quando comparados aos de 1991-2016. Isso implica dizer que a susceptibilidade a desertificação está se intensificando no último período analisado (1991-2016) na bacia do rio Brígida, e que provavelmente se deve a redução de precipitação associada ao aumento da evapotranspiração.

Tabela 40 – Análise de tendência temporal do AI_{ASD} no aplicativo TREND no período de 1961 a 1990 e 1991 a 2016 para os 38 postos pluviométricos localizados na bacia do rio Brígida.

Testes	NS	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
Mann-kendall	47%	32%	18%	3%
Spearman's Rho	50%	26%	18%	5%
Linear regression	39%	26%	29%	5%
Cumulative deviation	58%	18%	16%	8%
Worsley likelihood	61%	32%	5%	3%
Rank Sum	47%	21%	26%	5%
Student's ¹	21%	11%	37%	32%

Fonte: A Autora (2020).

NS = Não significativo para $\alpha = 0,05$ e $0,01$.

¹ Todos os postos que apresentaram diferença significativa obtiveram a média de 1961-1990 maior que 1991-2016.

Esse raciocínio pode ser ratificado pelos resultados obtidos no estudo da Fiocruz (2017), onde observou-se que no Estado de Pernambuco, a região da bacia do rio São Francisco será a mais afetada pela redução da precipitação, assim como, terá um incremento da evapotranspiração, segundo Sá *et al.* (2010).

A evolução da aridez e da susceptibilidade a desertificação no Nordeste, mas especificamente na bacia do rio Brígida pode ser justificada por diversos fatores, a exemplo das atividades conduzidas pelo homem, como pecuária, irrigação, desmatamento, mineração e cultivo excessivo, além do sistema de propriedade da terra e da superpopulação, segundo CGEE (2016).

Tal premissa é bastante coerente com a bacia do rio Brígida, haja vista que em seu território encontra-se situado o Polo Gesseiro do Araripe, que tem como principal atividade, a exploração mineral da gipsita. Essa atividade desenvolvida por anos na bacia sem o devido manejo florestal, projetos de recuperação de áreas degradadas, associado ao déficit de fiscalização ambiental, contribuiu consideravelmente para a degradação ambiental da região, o que segundo Araújo (2004) e Granja *et al.* (2017) podem fazer com que a desertificação se torne algo concreto rapidamente.

Lucena *et al.* (2018), ao estudar a aridez no estado do Rio Grande do Norte, verificaram que o município de Caicó está altamente susceptível ao processo de desertificação, haja vista que o valor médio do índice de aridez foi de 0,41, no período de 1996-2013. Esses autores, observaram resultados semelhantes aos

encontrados na bacia do rio Brígida, no período de 1991-2016, onde notou-se um incremento da aridez e da susceptibilidade ao processo de desertificação.

Os resultados das pesquisas acima apresentados denotam que ações públicas relacionadas ao desenvolvimento de modo sustentável devem ser iniciadas o mais breve possível na região da bacia do rio Brígida, de modo a se reduzir a susceptibilidade do território ao processo de desertificação. Para tanto, pode ser empregado o AI_{ASD} que avalia mediante dados de precipitação e evapotranspiração, a susceptibilidade a desertificação, podendo ser uma ferramenta valiosa para o monitoramento pelos órgãos públicos e privados.

5.6 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO

A estatística descritiva contendo os valores máximo, mínimo, médio e desvio padrão para cada um dos índices de vegetação estimados pode ser verificada no Apêndice A. Os hidrogramas contendo a precipitação acumulada dos 20 (vinte) dias anteriores a data da imagem de satélite podem ser visualizados no Apêndice B. Esses hidrogramas demonstraram que nos primeiros anos da série histórica analisada a precipitação acumulada em alguns postos da bacia apresentaram quantitativos superiores as médias históricas das normais de 1961-1990 e de 1991-2016, enquanto que nos últimos anos foram anos consecutivos de seca.

Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)

A partir da análise dos dados de NDVI (Tabela 41), no período de 1986 a 2011 verificou-se que as categorias N1, N2 e N3, que correspondem respectivamente as faixas de Extremamente Seco, Seco e Moderadamente Seco, reunidas perfazem cerca de 69,69% dos registros, enquanto que as categorias N4 (Úmido) e N5 (Extremamente Úmido) alcançam somente 30,31% dos dados. Esses resultados sugerem que a bacia do rio Brígida permanece boa parte do tempo em condição de estresse hídrico, ou seja, com pouca disponibilidade hídrica que favoreça o desenvolvimento da vegetação em sua condição ótima.

Tabela 41 – Classes de NDVI (%) no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.

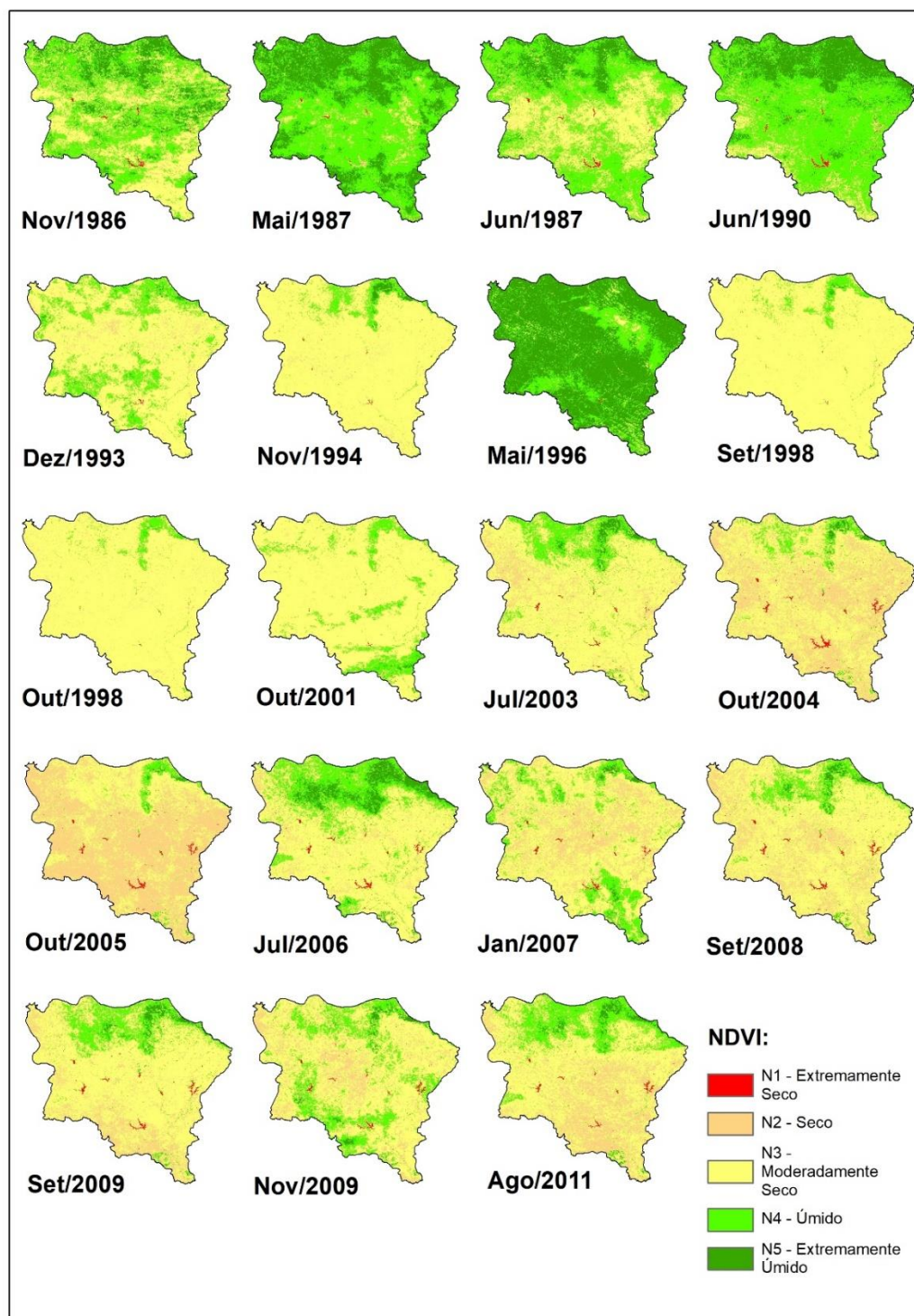
Data	N1	N2	N3	N4	N5
28/11/1986	0,34%	1,81%	40,31%	42,57%	14,97%
23/05/1987	0,13%	0,37%	7,41%	55,72%	36,36%
24/06/1987	0,31%	0,74%	39,61%	46,90%	12,44%
16/06/1990	0,38%	0,30%	14,03%	60,79%	24,49%
17/12/1993	0,06%	3,59%	76,60%	18,98%	0,77%
02/11/1994	0,08%	2,32%	90,24%	6,05%	1,31%
15/05/1996	0,04%	0,19%	3,76%	23,01%	73,00%
26/09/1998	0,03%	1,24%	94,03%	4,50%	0,20%
28/10/1998	0,03%	2,79%	93,52%	3,53%	0,13%
04/10/2001	0,03%	0,79%	87,39%	11,34%	0,45%
06/07/2003	0,26%	11,43%	72,32%	13,58%	2,41%
12/10/2004	0,75%	38,49%	53,99%	5,76%	1,02%
15/10/2005	0,55%	58,69%	37,08%	3,21%	0,47%
30/07/2006	0,50%	6,46%	63,25%	21,42%	8,37%
22/01/2007	0,37%	23,65%	60,37%	14,13%	1,48%
21/09/2008	0,61%	21,74%	66,45%	9,46%	1,75%
24/09/2009	0,54%	14,89%	69,19%	13,12%	2,26%
27/11/2009	0,44%	14,98%	63,91%	18,89%	1,78%
29/08/2011	0,38%	24,07%	56,31%	16,87%	2,36%

Fonte: A Autora (2020).

N1: Extremamente Seco; N2: Seco; N3: Moderadamente Seco; N4: Úmido e N5: Extremamente úmido.

Aliado a isso, os resultados demonstraram que na escala temporal de 1986-2011 (Figura 15) está havendo a evolução da seca, sobretudo nos trechos de altitude menos elevada na bacia, que correspondem a Depressão Sertaneja. Da mesma forma, que está acontecendo a concentração de períodos úmidos na parte onde o relevo é mais elevado, onde encontra-se a Chapada do Araripe.

Figura 15 – Classes de NDVI no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.



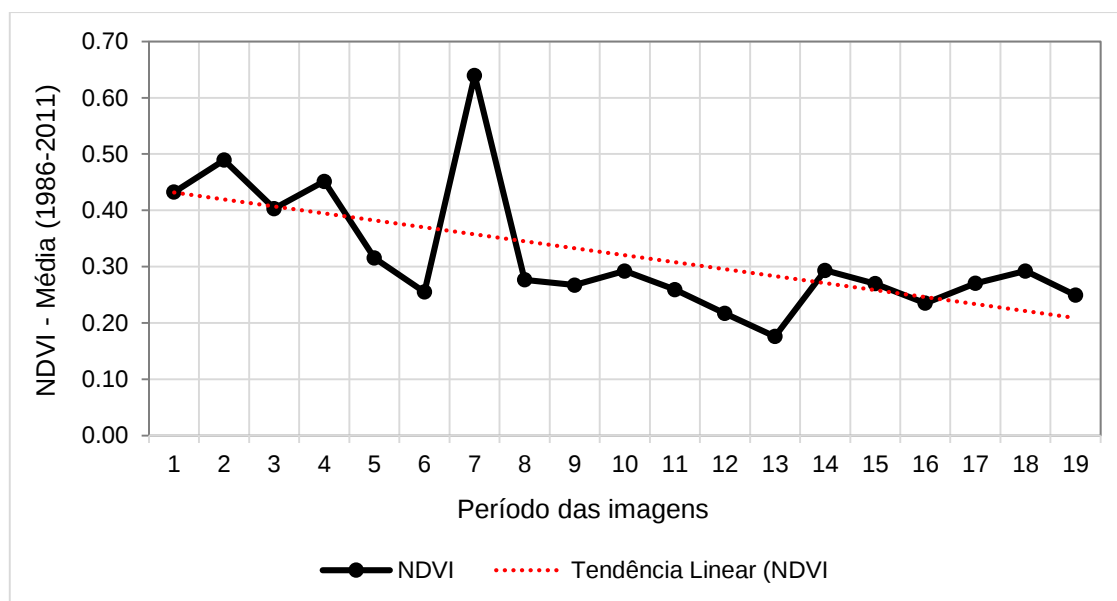
Fonte: A Autora (2020).

Essa condição se deve provavelmente ao efeito orográfico na bacia, que já foi detectado por diversos autores, como Conti (2205), Fachine (2014) e Dantas *et al.* (2018), e que segundo Ganem (2017), é muito comum em regiões elevadas como a

Chapada do Araripe, com altitudes superiores a 900 metros, onde a bacia do rio Brígida está situada.

Os resultados também indicaram que a média histórica dos valores do NDVI vem diminuindo ao longo do tempo (Figura 16), o que sugere a redução da vegetação em virtude de estiagem prolongada na região da bacia do rio Brígida. Condição extremamente preocupante, pois pode em longo prazo favorecer a progressão da aridez e aumentar a susceptibilidade a desertificação.

Figura 16 – Média histórica (1986-2011) do valor de NDVI na bacia do rio Brígida.



Fonte: A Autora (2020).

Tal premissa pode ser ratificada a partir da análise de tendência climática dos valores de NDVI (Tabela 42), cujo valores demonstraram mediante o Teste de Student's que há uma diferença estatística significativa entre os últimos anos da série analisada em contraposição aos anos mais antigos.

Isso implica dizer que em determinada escala temporal está havendo a diminuição da condição da vegetação, e que se nada for feito o bioma Caatinga, predominante na bacia do rio Brígida poderá ser severamente comprometido, sobretudo, se observada a condição de exploração contínua por conta do Polo gesso do Araripe, que segundo Araújo (2004) e Granja *et al.* (2017), contribuíram significativamente para a degradação ambiental da região.

Tabela 42 – Análise de tendência climática do NDVI no aplicativo TREND no período de 1986 a 2011 na bacia do rio Brígida.

Testes	NS	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
Mann-kendall	21%	10%	24%	45%
Spearman's Rho	14%	10%	28%	48%
Linear regression	17%	21%	31%	31%
Cumulative deviation	14%	14%	41%	31%
Worsley likelihood	21%	21%	31%	28%
Rank Sum	21%	7%	21%	52%
Student's	0%	0%	0%	100%

Fonte: A Autora (2020).

NS = Não significativo para $\alpha = 0,05$ e $0,01$.

Os resultados de redução da condição de vegetação na bacia do rio Brígida são análogos aos obtidos por Barbosa *et al.* (2019), os quais verificaram através do uso do NDVI no período de 2008-2016, o impacto da seca na região Nordeste do Brasil, no intervalo de 2012 a 2015, em virtude do déficit pluviométrico.

Bajgain *et al.* (2015), observaram que o uso do NDVI pode ser um indicador simples, eficaz e complementar para avaliar a seca na pradaria de capim alto. Esses autores também verificaram que longos períodos de seca na escala analisada (2000-2013) impactaram consideravelmente a condição da vegetação. Ou seja, resultados semelhantes a bacia do rio Brígida, que no período de 1986-2011 detectou-se a redução da condição da vegetação mediante emprego do NDVI, em decorrência de secas que acometem a região reiteradas vezes.

Índice de Vegetação Melhorado (EVI)

De acordo com os resultados do EVI (Tabela 43), verificou-se que as classes E1 (Extremamente Seco), E2 (Seco) e E3 (Moderadamente Seco) representam cerca de 86,64% dos dados analisados no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida, enquanto que o período úmido representado pelas faixas E4 (Úmido) e E5 (Extremamente Úmido) totalizam somente 13,36% dos registros. Esses resultados são bastante preocupantes, pois indicam que a área de estudo é frequentemente afetada por secas, e no médio e longo prazo pode favorecer o incremento da aridez e consequentemente a elevação da susceptibilidade a desertificação, que afeta permanentemente a condição da vegetação.

Tabela 43 – Classes de EVI (%) no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.

Data	E1 (%)	E2 (%)	E3 (%)	E4 (%)	E5 (%)
28/11/1986	0,34%	14,41%	60,62%	23,37%	1,27%
23/05/1987	0,11%	0,90%	52,05%	43,98%	2,96%
24/06/1987	0,31%	12,49%	70,32%	16,64%	0,24%
16/06/1990	0,38%	3,10%	67,37%	27,82%	1,34%
17/12/1993	0,06%	53,46%	44,48%	1,99%	0,01%
02/11/1994	0,08%	76,82%	21,81%	1,27%	0,01%
15/05/1996	0,03%	1,25%	14,25%	61,79%	22,68%
26/09/1998	0,03%	79,15%	20,64%	0,17%	0,01%
28/10/1998	0,03%	80,35%	19,46%	0,15%	0,01%
04/10/2001	0,03%	65,53%	33,75%	0,64%	0,04%
06/07/2003	0,00%	48,48%	45,48%	5,80%	0,25%
12/10/2004	0,75%	76,16%	20,54%	2,39%	0,16%
15/10/2005	0,55%	87,35%	10,50%	1,49%	0,10%
30/07/2006	0,50%	48,62%	34,78%	14,60%	1,50%
22/01/2007	0,37%	54,21%	40,37%	4,84%	0,20%
21/09/2008	0,60%	74,98%	21,25%	3,08%	0,09%
24/09/2009	0,54%	68,47%	27,17%	3,74%	0,08%
27/11/2009	0,44%	49,32%	45,27%	4,97%	0,00%
29/08/2011	0,36%	66,65%	28,76%	4,11%	0,12%

Fonte: A Autora (2020).

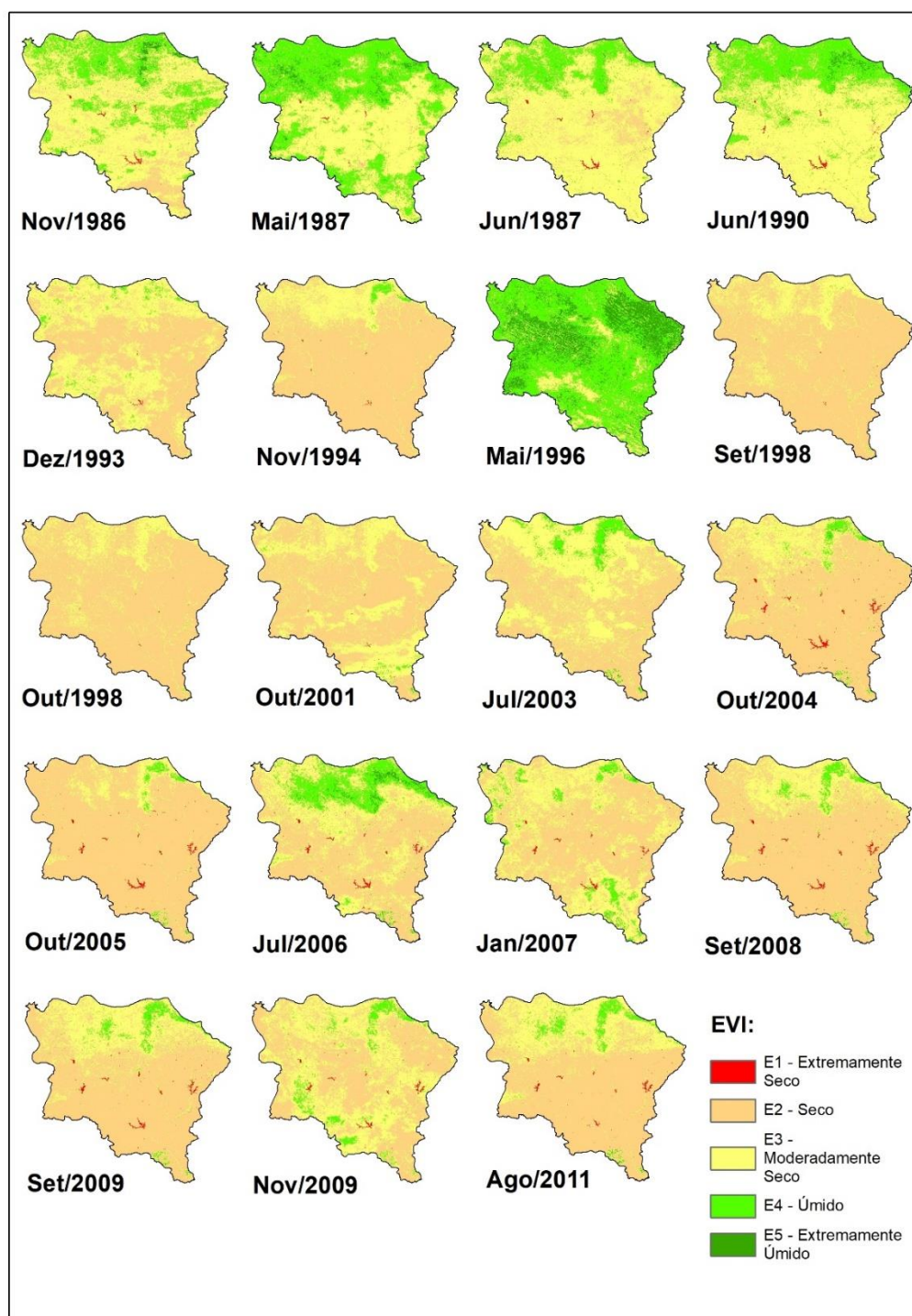
E1: Extremamente Seco; E2: Seco; E3: Moderadamente Seco; E4: Úmido e E5: Extremamente úmido.

Além disso, é possível notar que as faixas de umidade (E4 e E5) estão concentradas na parte elevada da bacia, e que as classes referentes as categorias Seco (E2) e Extremamente Seco (E1) ocorrem apenas na parte da Depressão Sertaneja, assim como verificado para o NDVI. Indicando uma forte influência do fenômeno orográfico na região, que contribuem para a ocorrência de chuvas isoladas apenas na Chapada do Araripe.

Os resultados também demonstram que na escala temporal está havendo a intensificação de períodos secos, haja vista que faixas anteriormente classificadas como Moderadamente Seco (E3) nos anos de 1986 a 1990, passaram a ser categorizadas como Seco (E2), no intervalo de 1993 a 2011, conforme ilustrado na Figura 17.

Esse comportamento sugere que a condição da vegetação está sendo afetada de modo significativo pela redução da precipitação na bacia, fenômeno este também detectado na análise dos índices de seca e de aridez no presente estudo e que foram descritos nos **itens 5.4 e 5.5**.

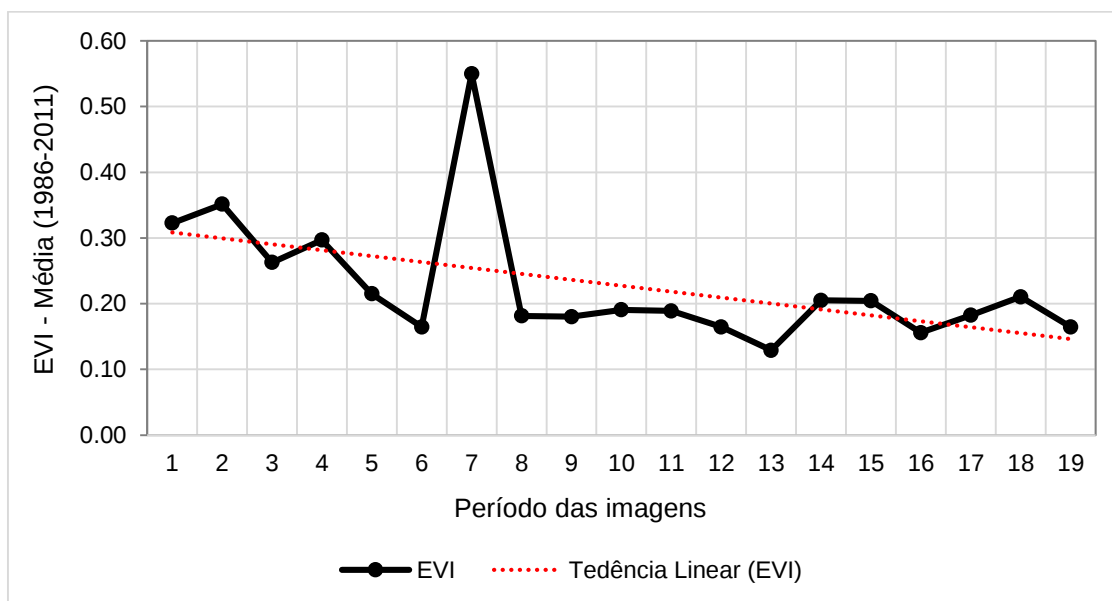
Figura 17 – Classes de EVI no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.



Fonte: A Autora (2020).

A média histórica (1986-20110) também demonstrou uma tendência de diminuição nos valores de EVI (Figura 18), o que sugere uma intensificação dos períodos secos que interferem diretamente no desenvolvimento da vegetação.

Figura 18 – Média histórica (1986-2011) do valor de EVI na bacia do rio Brígida.



Fonte: A Autora (2020).

Esse desempenho também foi observado na análise de tendência climática (Tabela 44), onde verificou-se uma diferença significativa nos valores de EVI no Teste de Student's nos últimos anos da série histórica quando comparado aos primeiros anos, sugerindo a ocorrência da redução da vegetação na região.

Tabela 44 – Análise de tendência climática do EVI no aplicativo TREND no período de 1986 a 2011 na bacia do rio Brígida.

Testes	NS	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
Mann-kendall	31%	10%	14%	45%
Spearman's Rho	24%	14%	14%	48%
Linear regression	38%	17%	24%	21%
Cumulative deviation	34%	17%	28%	21%
Worsley likelihood	45%	21%	21%	14%
Rank Sum	28%	7%	21%	45%
Student's	0%	0%	0%	100%

Fonte: A Autora (2020).

NS = Não significativo para $\alpha = 0,05$ e $0,01$.

Os resultados acima apresentados precisam ser monitorados, pois a sua intensificação sugere a ocorrência de cenários futuros não muito promissores, pois segundo Fiocruz (2017) a região do São Francisco, onde a bacia do rio Brígida está situada seria a mais afetada pela redução da precipitação, chegando a alcançar um volume de -39%. Isso implica dizer, que o desenvolvimento natural da vegetação

mediante a ocorrência de precipitação estará comprometido, o que pode propiciar a aceleração de processo de desertificação na região, inviabilizando o desenvolvimento da agricultura de subsistência devido a perda da produtividade do solo.

Tal situação também foi observada por Reinermann *et al.* (2019), os quais identificaram mediante análise de série temporal (2000-2018) de EVI na Alemanha, a ocorrência de secas que afetaram de modo significativo a vegetação, sobretudo, nos períodos secos.

Falzo *et al.* (2019), verificaram por meio do EVI que houve uma evolução da seca no período de 1981 a 2018 na Irlanda, sendo o ano de 2018 o de seca mais severa. Isso demonstra que esses autores encontraram resultados semelhantes aos obtidos na bacia do rio Brígida, ou seja, de intensificação das secas e, consequente redução da condição da vegetação através dos valores de EVI.

Esses resultados evidenciam que o aumento da magnitude das secas e consequente perda da vegetação não é uma ocorrência local, mas sim global e que provavelmente está relacionada aos efeitos das mudanças climáticas, sobretudo nos parâmetros de precipitação, temperatura e evapotranspiração, que interferem de modo direto no regime hidrológico.

Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI)

Os resultados de SAVI (Tabela 45) indicam que as categorias SA1 (Extremamente Seco), SA2 (Seco) e SA3 (Moderadamente Seco) reunidas equivalem a 97,1% dos registros, ao passo que as categorias SA4 (Úmido) e SA5 (Extremamente Úmido) perfazem apenas 2,90% dos dados analisados.

Aliado a isso, verificou-se que cerca de 67% dos resultados encontram-se compreendidos na faixa SA2 e 30% na classe SA3, o que é muito alarmante pois sugere que a bacia do rio Brígida é constantemente afetada por eventos hidrológicos extremos, como secas e estiagens que afetam diretamente a condição da vegetação.

Esse comportamento em determinada escala temporal pode ser determinante para aumentar a susceptibilidade da região a desertificação, o que requer medidas urgentes quanto ao uso adequado do solo, assim como, gestão dos recursos hídricos, de modo a evitar que esse fenômeno se instale de modo definitivo, prejudicando a agricultura, e, consequentemente a economia local.

Tabela 45 – Classes de SAVI (%) no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.

Data	SA1 (%)	SA2 (%)	SA3 (%)	SA4 (%)	SA5 (%)
28/11/1986	0,34%	41,72%	55,68%	2,26%	0,00%
23/05/1987	0,13%	9,42%	85,53%	4,91%	0,00%
24/06/1987	0,31%	52,31%	46,90%	0,48%	0,00%
16/06/1990	0,38%	24,76%	72,11%	2,75%	0,00%
17/12/1993	0,06%	75,27%	24,58%	0,08%	0,00%
02/11/1994	0,08%	88,87%	10,86%	0,20%	0,00%
15/05/1996	0,04%	2,74%	59,49%	37,59%	0,15%
26/09/1998	0,03%	94,12%	5,83%	0,02%	0,00%
28/10/1998	0,03%	94,55%	5,39%	0,03%	0,00%
04/10/2001	0,03%	85,55%	14,31%	0,10%	0,00%
06/07/2003	0,26%	76,39%	22,87%	0,48%	0,00%
12/10/2004	0,75%	85,55%	13,32%	0,37%	0,00%
15/10/2005	0,55%	93,64%	5,64%	0,17%	0,00%
30/07/2006	0,50%	67,09%	29,94%	2,46%	0,00%
22/01/2007	0,37%	76,73%	22,45%	0,45%	0,00%
21/09/2008	0,61%	81,61%	17,24%	0,53%	0,00%
24/09/2009	0,54%	75,71%	23,07%	0,68%	0,00%
27/11/2009	0,44%	67,06%	31,59%	0,91%	0,00%
29/08/2011	0,38%	75,80%	23,43%	0,39%	0,00%

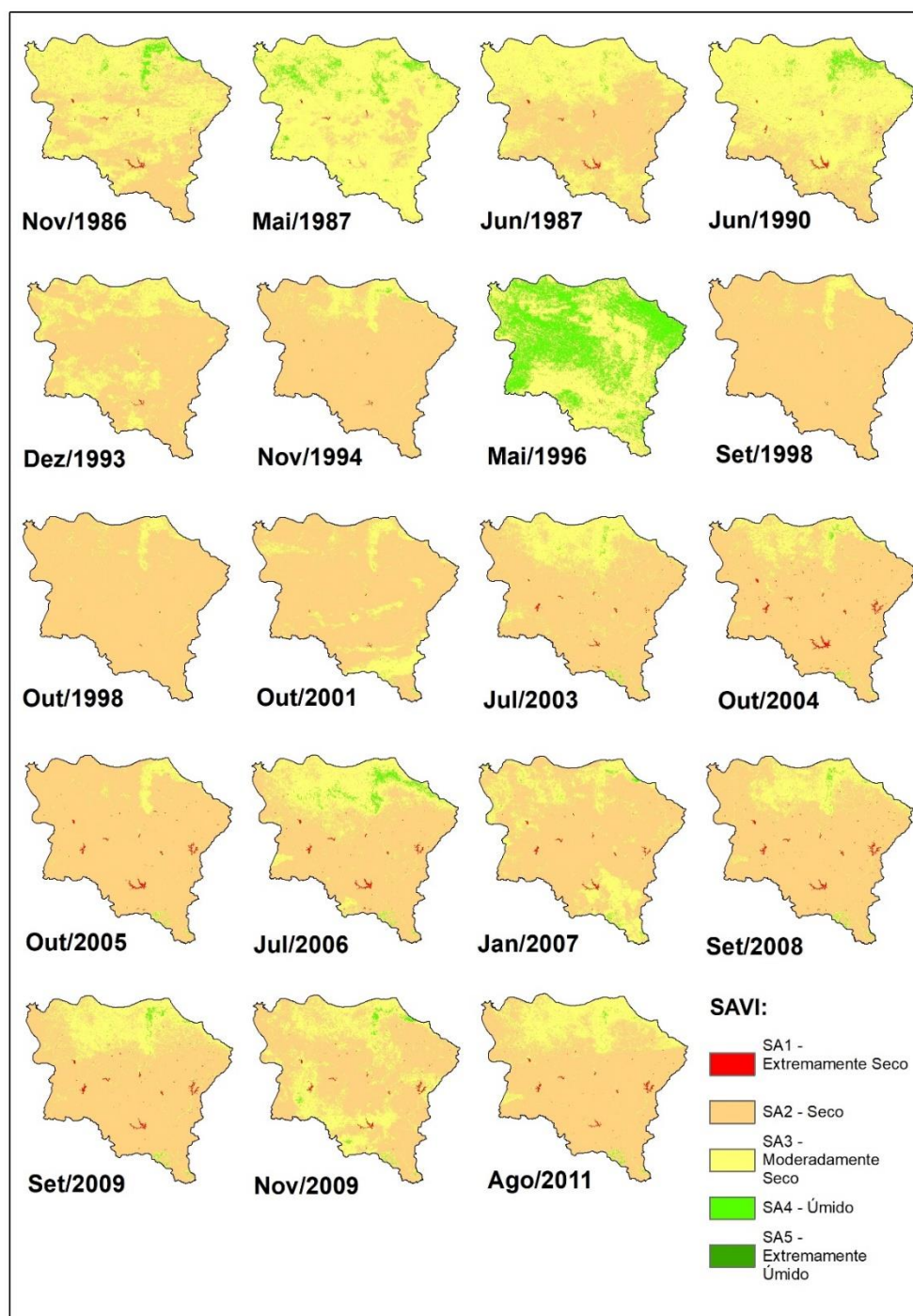
Fonte: A Autora (2020).

SA1: Extremamente Seco; SA2: Seco; SA3: Moderadamente Seco; SA4: Úmido e SA5: Extremamente úmido.

Esse desempenho pode ser claramente observado na Figura 19, onde nota-se que mediante a evolução temporal, as faixas de Seco (SA2) estão ocorrendo de modo predominante na parte de altitude menos elevada na bacia, enquanto que a Chapada do Araripe é a única parte da bacia que ainda permanece com a presença de valores categorizados como úmidos. Tal comportamento também foi observado nos valores de NDVI e EVI anteriormente descritos.

Os dados também sugerem que a magnitude dos períodos secos vem se intensificando, pois, as manchas de valores da faixa SA2 (Seco) que ocorriam de modo isolado e esparsos nos anos de 1986 a 1990 passaram a acontecer de forma crescente nos anos posteriores, sendo detectado inclusive aumento de pontos isolados da faixa SA1 (Extremamente Seco).

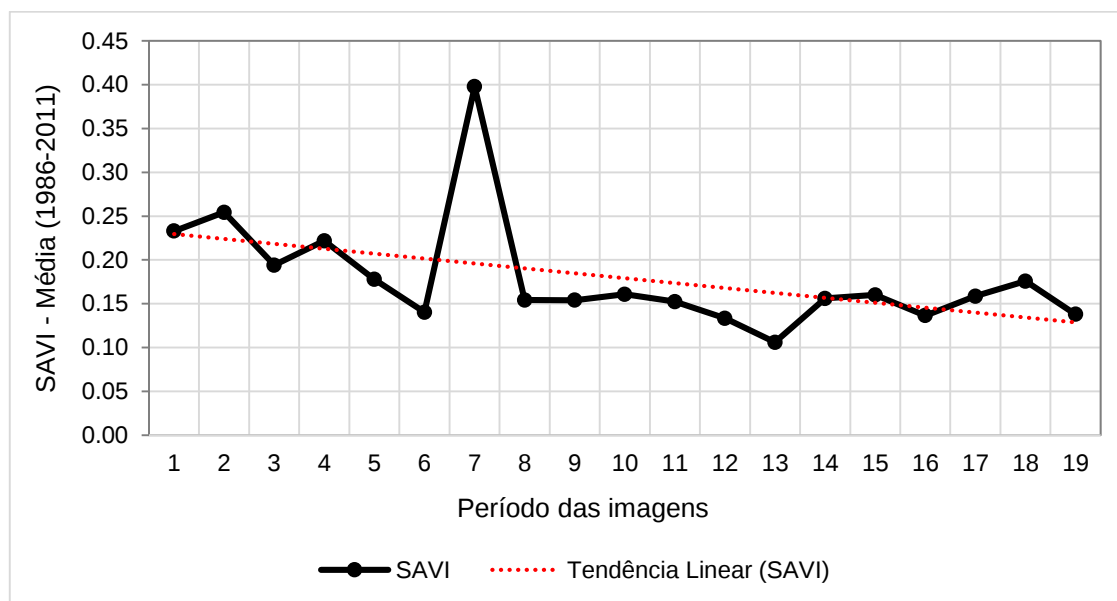
Figura 19 – Classes de SAVI no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.



Fonte: A Autora (2020).

Tal desempenho também foi observado na análise da média histórica (1986-2011) dos valores de SAVI, onde verificou-se que houve o decréscimo dos valores com o passar dos anos, sugerindo que a condição da vegetação vem reduzindo consideravelmente, como demonstra a linha de tendência ilustrada na Figura 20.

Figura 20 – Média histórica (1986-2011) do valor de SAVI na bacia do rio Brígida.



Fonte: A Autora (2020).

Essa performance também foi detectada na análise de tendência (Tabela 46), através dos resultados do Teste de Student's cujo valores revelaram diferenças estatísticas significativas no período analisado, indicando que os últimos anos da série são menores quando comparados aos primeiros anos. Ou seja, houve uma redução considerável da vegetação no território da bacia do rio Brígida.

Tabela 46 – Análise de tendência climática do SAVI no aplicativo TREND no período de 1986 a 2011 na bacia do rio Brígida.

Testes	NS	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
Mann-kendall	38%	10%	10%	41%
Spearman's Rho	38%	7%	7%	48%
Linear regression	48%	7%	31%	14%
Cumulative deviation	45%	14%	24%	17%
Worsley likelihood	48%	17%	17%	17%
Rank Sum	24%	14%	24%	38%
Student's	0%	0%	0%	100%

Fonte: A Autora (2020).

NS = Não significativo para $\alpha = 0,05$ e $0,01$.

Esses dados são muito inquietantes, pois segundo UNCCD (2014), as terras secas possuem elevada susceptibilidade a desertificação, e esse fenômeno pode ser acelerado mediante atividades conduzidas pelo homem, como pecuária, irrigação, desmatamento e superpopulação, como descreve CGEE (2016).

Marusig *et al.* (2019), ao empregar o uso de sensoriamento remoto mediante NDVI e SAVI detectaram uma maior frequência de mortalidade de árvores e declínio florestal devido à intensidade da seca ocorrida no verão de 2019.

Silva *et al* (2019), ao analisarem o SAVI detectaram baixa condição da biomassa vegetal ao longo do tempo, e sensibilidade da vegetação de Caatinga à presença e/ou ausência de chuva, de modo que a região semiárida encontra-se mais vulnerável devido à intensificação dos eventos de seca.

Todos os resultados acima descritos se relacionam de modo direto aos observados na bacia do rio Brígida, onde a condição da vegetação vem piorando ao longo do tempo em virtude da ocorrência reiterada de secas na região.

Índice de Vegetação Padronizado (SVI)

A partir da análise dos dados de SVI (Tabela 47), no período de 1986-2011, na bacia do rio Brígida verificou-se que a classe SV4 (Normal) corresponde a 73% dos registros, enquanto que as classes referentes a categoria seca (SV1, SV2 e SV3) juntas perfazem 9% e a faixa de valores úmidos (SV5, SV6 e SV7) totalizam cerca de 18%.

Diferentemente dos resultados obtidos no NDVI, EVI e SAVI, cujo valores apresentaram resultados semelhantes aos observados nos índices de seca e de aridez na bacia do rio Brígida, ou seja, incremento da seca e aridez e da susceptibilidade a desertificação em virtude de redução de precipitação, elevação de temperatura e aumento da evapotranspiração.

Os resultados observados sugerem que o SVI possui uma sensibilidade menor ao impacto da seca quando comparados aos outros índices, não refletindo de modo apropriado a condição real observada, haja vista que majoritariamente foi observada uma redução da condição de vegetação nos demais índices, como NDVI, EVI e SAVI para o mesmo período analisado (1986-2011).

Tabela 47 – Classes de SVI (%) no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.

Data	SV1 (%)	SV2 (%)	SV3 (%)	SV4 (%)	SV5 (%)	SV6 (%)	SV7 (%)
28/11/1986	0,16%	0,32%	1,50%	61,76%	20,79%	11,07%	4,39%
23/05/1987	0,14%	0,17%	0,16%	18,62%	28,27%	32,43%	20,22%
24/06/1987	0,05%	0,11%	0,46%	69,88%	24,16%	5,04%	0,31%
16/06/1990	0,03%	0,05%	0,16%	30,09%	37,82%	24,78%	7,08%
17/12/1993	0,24%	0,89%	5,33%	89,10%	3,33%	1,01%	0,10%
02/11/1994	0,03%	0,30%	2,87%	96,38%	0,37%	0,04%	0,01%
15/05/1996	0,19%	0,12%	0,25%	7,75%	7,17%	17,87%	66,65%
26/09/1998	0,03%	0,44%	4,26%	95,10%	0,12%	0,04%	0,00%
28/10/1998	0,17%	0,88%	7,20%	91,60%	0,10%	0,03%	0,01%
04/10/2001	0,13%	0,64%	5,04%	90,62%	2,47%	0,97%	0,14%
06/07/2003	0,05%	0,17%	2,66%	96,30%	0,64%	0,15%	0,03%
12/10/2004	0,47%	1,48%	25,74%	72,17%	0,12%	0,02%	0,00%
15/10/2005	0,14%	3,78%	56,34%	39,63%	0,10%	0,02%	0,00%
30/07/2006	0,05%	0,18%	1,14%	88,61%	7,59%	2,25%	0,18%
22/01/2007	0,24%	1,27%	15,34%	78,36%	3,18%	1,38%	0,23%
21/09/2008	0,10%	0,38%	8,10%	91,06%	0,29%	0,06%	0,01%
24/09/2009	0,03%	0,17%	6,17%	92,97%	0,57%	0,08%	0,01%
27/11/2009	0,43%	1,37%	6,63%	86,40%	3,58%	1,35%	0,24%
29/08/2011	0,26%	2,04%	12,08%	84,71%	0,75%	0,13%	0,02%

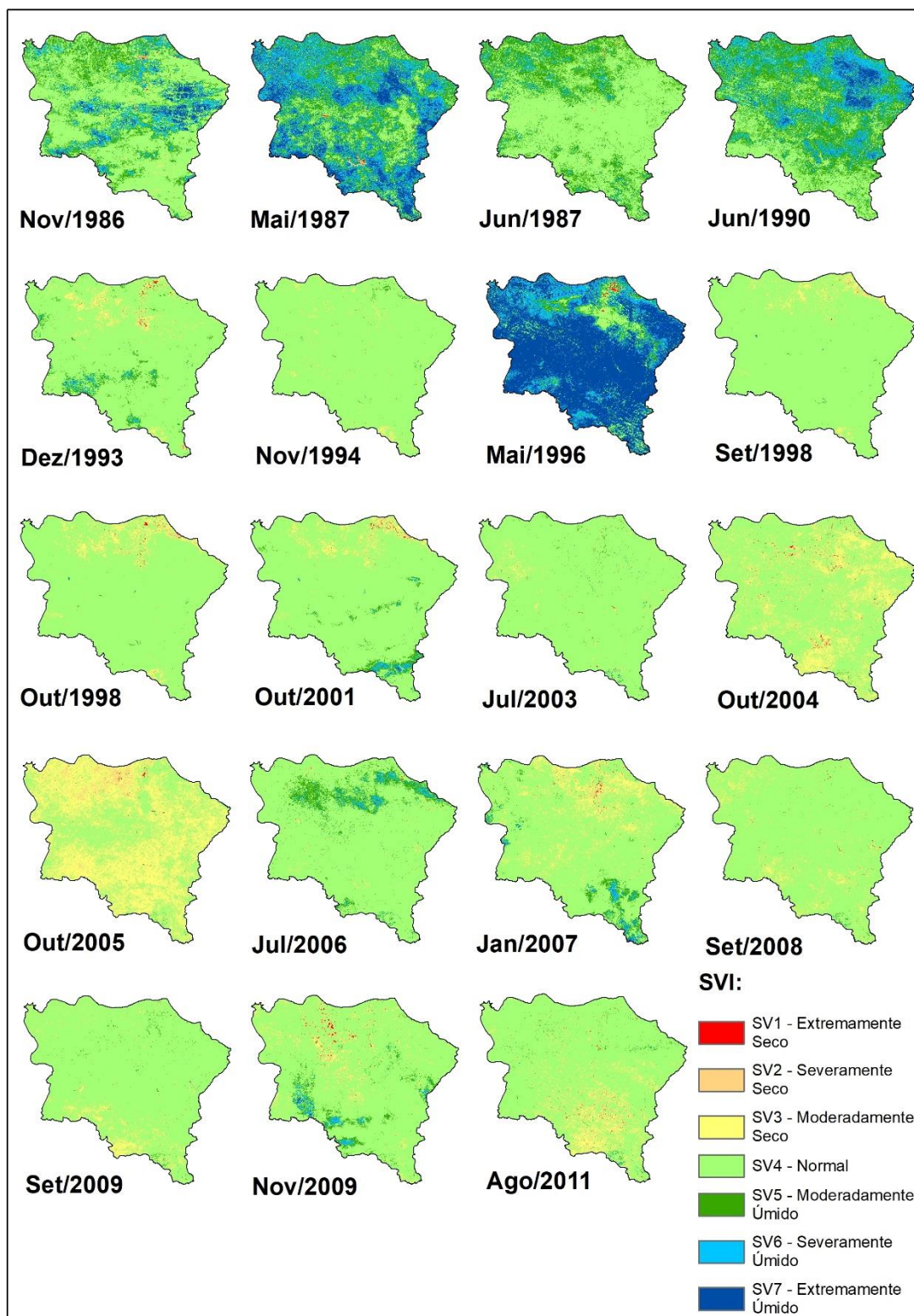
Fonte: A Autora (2020).

SV1: Extremamente Seco; SV2: Severamente Seco; SV3: Moderadamente Seco; SV4: Normal; SV5: Moderadamente Úmido; SV6: Severamente Úmido e SV7: Extremamente Úmido.

Apesar de os resultados do SVI (Figura 21) serem distintos aos demais índices estimados no presente estudo, nota-se que houve uma redução de períodos úmidos na bacia (SV5, SV6 e SV7), e que embora haja a redução da precipitação, a vegetação ainda se encontra fotossinteticamente ativa, ou seja, apta ao seu desenvolvimento em condição ótima, segundo o conceito de SVI definido por Peters *et al.* (2002).

Ainda que a interpretação visual do SVI demonstre que ao longo da escala temporal ocorram registros de modo dominante na classe SV4 (Normal) e que não há modificação significativa, a média histórica (1986-2011) ilustrada na Figura 22 insinua que há uma redução nos valores do SVI, e que estes se encontram em decréscimo mediante análise da linha de tendência.

Figura 21 – Classes de SVI no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.

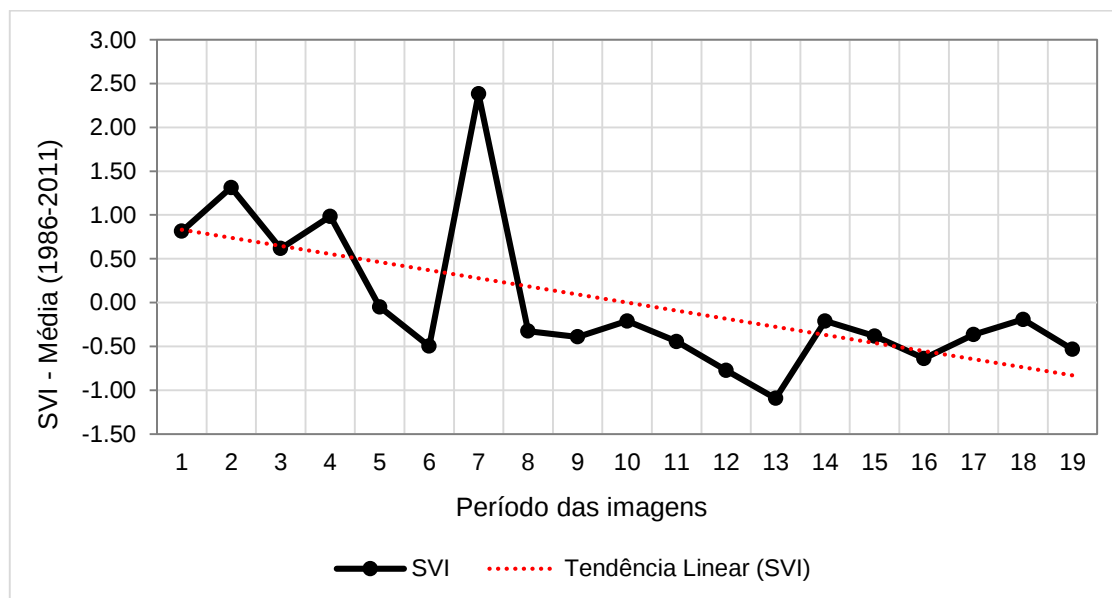


Fonte: A Autora (2020).

Esse desempenho condiz com os resultados da análise de tendência através do aplicativo TREND (Tabela 48), cujo apresentou em 76% dos valores analisados diferença estatística significativa ao nível de 0,1 (7%), 0,05 (52%) e 0,01 (17%) de

significância para o Teste de Student's, indicando que há uma redução da condição da vegetação nos últimos anos da série em comparação aos primeiros anos, mesmo que não seja perceptível a olho nu no processamento de SVI apresentado na Figura 21.

Figura 22 – Média histórica (1986-2011) do valor de SVI na bacia do rio Brígida.



Fonte: A Autora (2020).

Tabela 48 – Análise de tendência climática do SVI no aplicativo TREND no período de 1986 a 2011 na bacia do rio Brígida.

Testes	NS	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
Mann-kendall	21%	10%	24%	45%
Spearman's Rho	14%	10%	28%	48%
Linear regression	17%	21%	31%	31%
Cumulative deviation	14%	14%	41%	31%
Worsley likelihood	21%	21%	31%	28%
Rank Sum	21%	7%	21%	52%
Student's	24%	7%	52%	17%

Fonte: A Autora (2020).

NS = Não significativo para $\alpha = 0,05$ e $0,01$.

Os resultados obtidos na bacia do rio Brígida são parecidos aos encontrados por Rotjanakusol e Laosuwan (2019), cujo aplicaram o SVI na região Nordeste da Tailândia para avaliação da seca, e verificaram que a pior seca ocorreu em 2016, seguida pelos anos de 2014 e 2015.

Das *et al.* (2019) ao empregar SVI para o monitoramento da seca na Índia, no período de 1982-2015, verificaram que os menores valores de SVI correspondiam a anos de seca agrícola, cuja redução de precipitação estava associada. Situação análoga a encontrada na bacia do rio Brígida, onde detectou-se nas análises de tendência climática do SVI a redução dos valores nos últimos anos da série histórica, e que possivelmente estão associadas a redução de precipitação detectada através da análise de tendência descrita no item 5.1 do presente estudo.

Índice da Condição de Vegetação (VCI)

Os valores de VCI obtidos no período de 1986-2011 (Tabela 49) indicam que a categoria V4 (Úmido) corresponde a 46% dos dados, seguido da classe V3 (Normal) que perfaz cerca de 44% dos registros. As classes que se referem a períodos secos (V1 e V2) totalizam somente 0,3%.

Tabela 49 – Classes de VCI (%) no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.

Data	V1 (%)	V2 (%)	V3 (%)	V4 (%)	V5 (%)
28/11/1986	0,02%	0,86%	83,00%	16,12%	0,00%
23/05/1987	0,02%	0,27%	2,34%	64,42%	32,94%
24/06/1987	0,00%	0,18%	4,75%	90,96%	4,11%
16/06/1990	0,00%	0,28%	0,71%	63,00%	36,00%
17/12/1993	0,00%	0,00%	6,39%	93,11%	0,50%
02/11/1994	0,01%	0,08%	75,86%	22,22%	1,83%
15/05/1996	0,00%	0,01%	0,31%	30,20%	69,49%
26/09/1998	0,00%	0,09%	95,45%	4,46%	0,00%
28/10/1998	0,01%	0,13%	93,40%	6,32%	0,13%
04/10/2001	0,01%	0,04%	72,27%	26,83%	0,85%
06/07/2003	0,02%	0,21%	21,25%	73,78%	4,74%
12/10/2004	0,15%	0,54%	64,59%	32,41%	2,30%
15/10/2005	0,00%	0,14%	43,47%	55,86%	0,53%
30/07/2006	0,04%	0,43%	17,92%	66,66%	14,94%
22/01/2007	0,02%	0,37%	78,08%	21,38%	0,16%
21/09/2008	0,02%	0,54%	42,35%	52,98%	4,11%
24/09/2009	0,06%	0,48%	56,00%	38,59%	4,87%
27/11/2009	0,00%	0,26%	24,43%	69,56%	5,75%
29/08/2011	0,02%	0,32%	47,03%	45,90%	6,72%

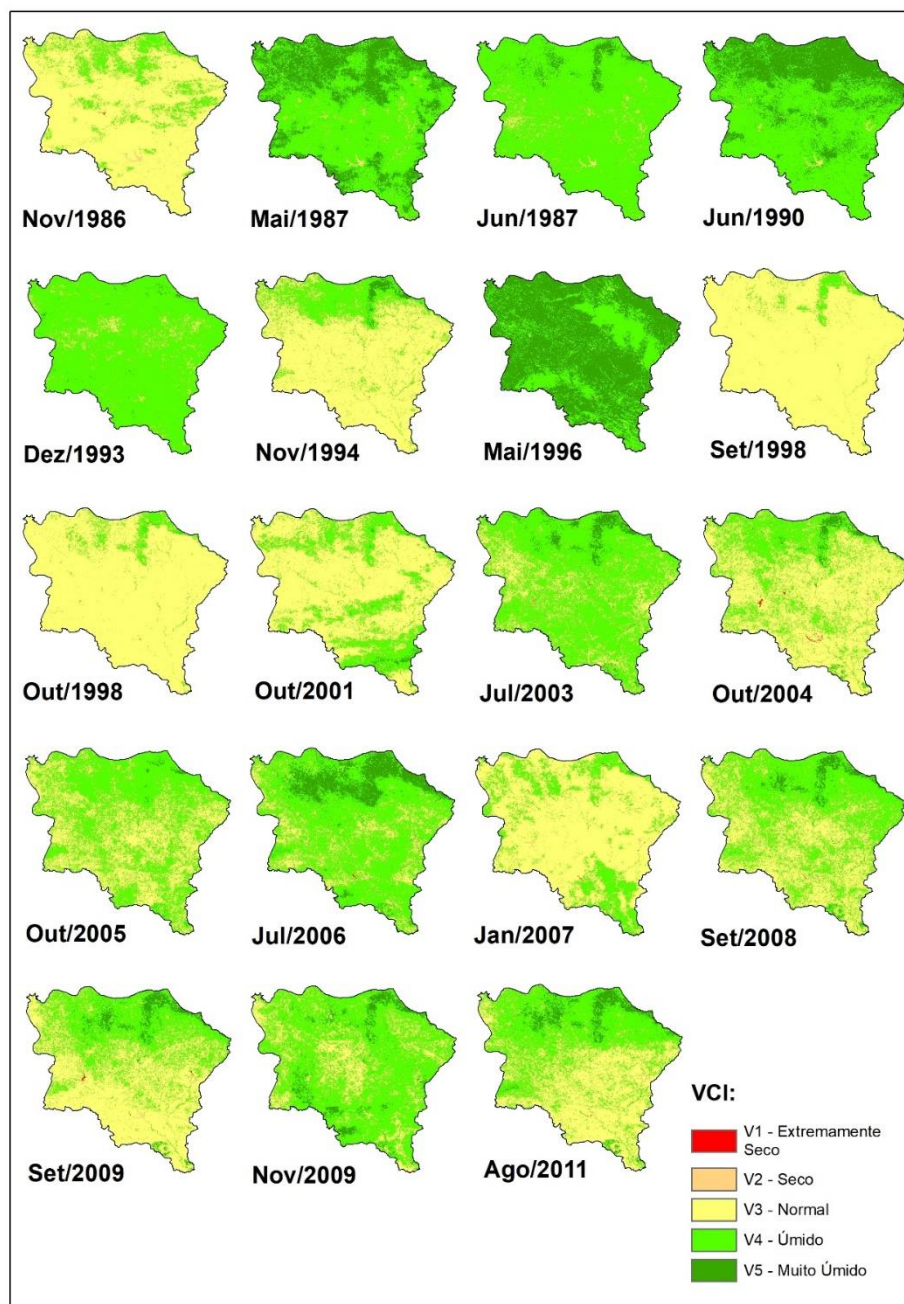
Fonte: A Autora (2020).

V1: Extremamente Seco; V2: Seco; V3: Normal; V4: Úmido e V5: Muito Úmido.

Os resultados obtidos foram distintos aos obtidos no NDVI, EVI e SAVI para o mesmo período analisado (1986-2011), sugerindo que o VCI não é tão sensível quanto os outros métodos empregados, no que se refere a quantificação da seca.

Isso provavelmente se deve ao fato de que o VCI é bastante usado para identificar situações de seca e o seu período de início, em áreas onde esses episódios ocorrem de modo localizado, segundo Liu e Kogan (1996). Fato este que é distinto da bacia do rio Brígida, haja vista que o território é acometido por sucessivos períodos contínuos de seca, de modo ininterrupto.

Figura 23 – Classes de VCI no período de 1986-2011 na bacia do rio Brígida.



Fonte: A Autora (2020).

A análise de tendência climática obtida por meio do aplicativo TREND revela que cerca de 72% dos valores estudados no território da bacia não apresentaram

diferença estatística significativa pelo Teste Student's (Tabela 50), e que apenas 28% dos valores exibiram diferenças estatísticas significativas aos níveis de 0,1 e 0,05 de significância, inferindo que os dados de VCI nos últimos anos são inferiores aos primeiros anos da série histórica analisada (1986-2011).

Tabela 50 – Análise de tendência climática do VCI no aplicativo TREND no período de 1986 a 2011 na bacia do rio Brígida.

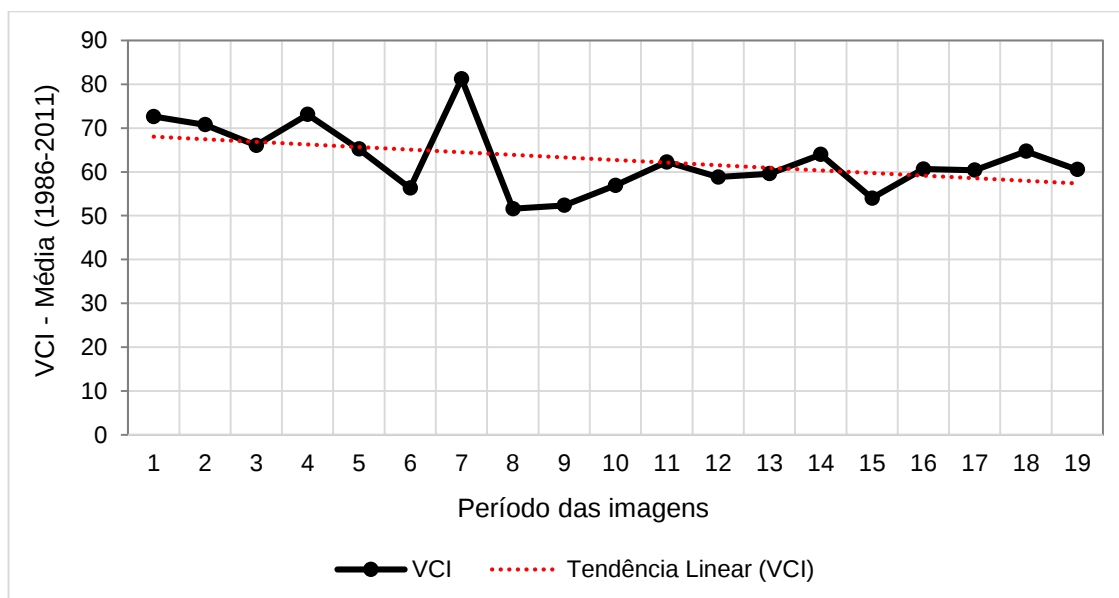
Testes	NS	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
Mann-kendall	72%	10%	10%	7%
Spearman's Rho	52%	17%	24%	7%
Linear regression	48%	24%	14%	14%
Cumulative deviation	31%	7%	34%	28%
Worsley likelihood	38%	17%	21%	24%
Rank Sum	79%	14%	7%	0%
Student's	72%	21%	7%	0%

Fonte: A Autora (2020).

NS = Não significativo para $\alpha = 0,05$ e 0,01.

Ainda que visualmente o processamento do VCI demonstre que não há alteração significativa nos quantitativos de vegetação, a média histórica (1986-2011) exibe que há uma tendência linear de diminuição dos valores de VCI (Figura 24), o que implica dizer que a condição da vegetação está piorando.

Figura 24 – Média histórica (1986-2011) do valor de VCI na bacia do rio Brígida.



Fonte: A Autora (2020).

Resultados distintos entre diferentes métodos de índices de vegetação para uma mesma área são comuns, pois cada um possui uma finalidade específica e classificação. Tal premissa se baseia nos resultados obtidos por Covele (2011), cujo

ênfatiza que o mesmo valor de NDVI, 0.448 por exemplo, se refere a condições médias de vegetação para VCI, classificação pobre para SVI e muito pobre para VPI, ou seja, o mesmo valor de NDVI poderá corresponder a diferentes condições de vegetação quando diferentes índices são usados.

Da mesma forma, Dikici e Aksel (2020), também observaram que o NDVI e o VCI apresentaram resultados distintos, sendo o NDVI mais apropriado para a bacia hidrográfica de Asi, na região do Mediterrâneo, na Turquia, do que o índice VCI para monitorar a seca.

Todas as pesquisas supracitadas demonstram que o emprego de técnicas de sensoriamento remoto para o monitoramento da seca é comum e muito usado em diversas partes do mundo, sobretudo, em regiões semiáridas, com elevada probabilidade ao fenômeno da desertificação, e suscetível aos impactos das mudanças climáticas, seja em escala local e/ou global.

Tais resultados denotam a importância de monitoramento contínuo, através de índices de vegetação como os empregados no presente estudo haja vista que alguns deles (NDVI, EVI e SAVI) mostraram de modo claro a ocorrência e intensificação da seca, servindo, portanto, como ferramenta aos gestores de recursos hídricos para o acompanhamento da disponibilidade hídrica frente a ocorrência de eventos hidrológicos extremos.

5.7 TESTE DE TUKEY

Índices de Seca

A análise estatística através do Teste de Tukey para as médias dos índices de seca (Tabela 51) revelou que nos meses de janeiro a julho e de novembro a dezembro, o tratamento 7 (PDSI) apresentou diferença estatística quando comparado aos demais tratamentos 2 a 6 (SPI), os quais não diferiram significativamente entre si. Acredita-se que tal resultado seja devido ao fato do PDSI ser um método mais complexo quando comparado aos demais índices de seca (RAI e SPI), pois emprega além de dados de precipitação, valores de evapotranspiração, recarga, escoamento e perda de umidade do solo para a sua estimativa.

Nos meses de agosto, setembro e outubro o tratamento 1 (RAI) apresentou diferença estatística quando comparado ao tratamento 7 (PDSI) e aos demais tratamentos 2 a 6 (SPI), os quais não diferiram significativamente entre si. Tal

resultado provavelmente se justifica porque os meses de agosto, setembro e outubro são os meses mais secos na região do Brígida, de acordo com os dados das Normais Climatológicas, o que ratifica a importância da análise de período seco e úmido para estudos hidrológicos de uma dada bacia, assim como, indica que estatisticamente o método RAI (tratamento 1) seria mais sensível às questões de anomalias na precipitação, quando comparados aos demais tratamentos (2 a 7).

No Teste de Tukey também se observou que no método SPI (tratamentos 2 a 6) independentemente da quantidade de meses acumulados (6, 12, 24, 36 ou 48), os resultados não diferem estatisticamente entre si, ou seja, o comportamento da seca na bacia do rio Brígida foi identificado da mesma forma em todos os tratamentos (2 a 6).

Sendo assim, os resultados estatísticos do Teste de Tukey apontam que para a avaliação da seca na bacia do rio Brígida, o PDSI se ajustou melhor quando comparado aos demais tratamentos, e que na ausência deste método poderá ser empregado o RAI sem prejuízo da análise. Além disto, a estatística aponta que se não for possível o emprego do PDSI ou do RAI, poderá ser usado o SPI com qualquer um dos tipos de meses acumulados (6, 12, 24, 36 e 48) como ferramentas alternativas para avaliação da seca na bacia do rio Brígida, e da susceptibilidade a desertificação.

Índices de Aridez

A análise estatística do Teste de Tukey para as médias dos índices de aridez (Tabela 52) sugeriu que em todos os meses do ano, o tratamento 9 (AI) apresentou diferença estatística quando comparada aos demais tratamentos. O Teste de Tukey também indicou que os 03 (três) métodos empregados (MIA, AI, AI_{ASD}) para análise da aridez na bacia do rio Brígida diferiram entre si estatisticamente.

Isso implica dizer que segundo o Teste de Tukey, para a avaliação da aridez na bacia do rio Brígida, o AI se ajustou melhor em comparação aos demais tratamentos (MIA e AI_{ASD}), e que não sendo possível a utilização do AI poderá ser adotada como método alternativo o MIA, e se não for possível, poderá ser usado o AI_{ASD} para a avaliação da aridez na região de estudo e da susceptibilidade a desertificação sem perda da confiabilidade dos resultados.

Tabela 51 – Análise estatística do Teste de Tukey para as médias dos índices de seca.

Tratamento	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1	-0.4501 b	-0.19862 b	-0.20114 b	-0.47483 b	-0.5753 b	-0.63402 b	-0.59994 b	-0.91836 a	-1.21691 a	-1.01375 a	-0.5303 b	-0.46562 b
2	-0.00222 b	-0.00039 b	0.00053 b	0.00012 b	0.00002 b	-0.00024 b	0.00086 b	0.00089 c	-0.01911 c	-0.04862 c	-0.03489 b	-0.00764 b
3	0.00007 b	0.00096 b	-0.00026 b	0.00017 b	0.00017 b	0.00001 b	-0.00012 b	-0.00019 c	-0.00018 c	-0.00001 c	0.00028 b	-0.00011 b
4	0.00015 b	0.00027 b	0.00004 b	0.00018 b	0.00036 b	0.00024 b	0.00009 b	0.00009 c	0.0001 c	0.0002 c	0.00016 b	-0.0002 b
5	0.00043 b	0.00047 b	0.00034 b	0.00042 b	0.00047 b	0.00043 b	0.0004 b	0.00041 c	0.00041 c	0.00046 c	0.00036 b	0.00034 b
6	0.00043 b	0.00059 b	0.0004 b	0.00047 b	0.00052 b	0.00049 b	0.00045 b	0.00046 c	0.00046 c	0.00051 c	0.00047 b	0.00052 b
7	-5.81513 a	-3.92524 a	-1.33564 a	-4.96505 a	-5.87731 a	-6.86455 a	-7.45598 a	-8.58406 b	-8.37621 b	-6.75809 b	-7.00738 a	-6.72485 a

Fonte: A Autora (2020).

Tratamento 1 = Índice de Anomalia de Chuva (RAI); Tratamento 2 = Índice de Precipitação Padronizado (SPI) acumulado em 6 meses; Tratamento 3 = Índice de Precipitação Padronizado (SPI) acumulado em 12 meses; Tratamento 4 = Índice de Precipitação Padronizado (SPI) acumulado em 24 meses; Tratamento 5 = Índice de Precipitação Padronizado (SPI) acumulado em 36 meses; Tratamento 6 = Índice de Precipitação Padronizado (SPI) acumulado em 48 meses; Tratamento 7 = Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI).

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 52 – Análise estatística do Teste de Tukey para as médias dos índices de aridez.

Tratamento	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
8	29.68374 b	32.55997 b	44.48714 b	27.30692 b	10.52385 b	4.58909 b	3.537108 b	1.240406 b	1.485797 b	3.928926 b	10.00747 b	20.30583 b
9	48.62154 a	61.64272 a	81.10747 a	60.76616 a	24.39913 a	11.63824 a	7.897361 a	2.336029 a	2.570431 a	6.180961 a	15.92445 a	31.10277 a
10	0.48616 c	0.6164 c	0.81103 c	0.60758 c	0.24391 c	0.11641 c	0.079084 c	0.023379 c	0.02563 c	0.061748 c	0.15933 c	0.31099 c

Fonte: A Autora (2020).

Tratamento 8 = Índice de Aridez de Martonne (MIA); Tratamento 9 = Índice de Aridez de Thornthwaite (AI); Tratamento 10 = índice de aridez de áreas suscetíveis a desertificação (AI_{ASD}).

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Índices de Vegetação

Os resultados na análise estatística do Teste de Tukey para as médias dos índices de vegetação (Tabela 53) indicaram que o tratamento 5 (VCI) é o que melhor se ajustou a bacia do rio Brígida para demonstrar a condição da vegetação, quando comparado aos demais tratamentos (NDVI, EVI, SAVI e SVI); ao passo que o tratamento 2 (NDVI) se diferenciou dos tratamentos 1, 3 e 4 (EVI, SAVI e SVI); e o tratamento 4 (SVI) diferiu significativamente do tratamento 1 e 3 (EVI e SAVI), que por sua vez, não diferiram significativamente entre si.

Tabela 53 – Análise estatística do Teste de Tukey para as médias dos índices de vegetação.

Tratamento	Média
1	0.093704 d
2	0.128336 b
3	0.074886 d
4	0.001102 c
5	1.813717 a

Fonte: A Autora (2020).

Tratamento 1 = Índice de Vegetação Melhorado (EVI); Tratamento 2 = Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI); Tratamento 3 = Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI); Tratamento 4 = Índice de Vegetação Padronizado (SVI); Tratamento 5 = Índice da Condição de Vegetação (VCI).

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Isso aponta que se não for possível o emprego do VCI poderá ser adotado como segunda opção o NDVI, seguido do SVI, do EVI e SAVI sem haver o comprometimento da confiabilidade dos resultados.

5.8 CORRELAÇÃO ESPACIAL

As interpolações IDW dos índices de seca e de aridez empregadas na análise da correlação espacial podem ser observadas no Apêndice C.

A matriz da correlação espacial entre o RAI e os índices de vegetação pode ser observada na Tabela 54, cuja interpretação demonstra que há correlações do tipo moderada da ordem de 32%, 21%, 32% 16% e 21%, para as variáveis EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI, respectivamente.

Além desses resultados, a matriz do RAI também permite concluir que em média, cerca de 27% dos valores de todas as variáveis analisadas (EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI) se enquadram na faixa de correlação inexistente, enquanto que 39% apresentaram correlação baixa, 9% muito baixa e 24% moderada. A matriz de

covariância do RAI evidenciou que os maiores graus de reação linear aconteceram nas datas de 23/05/1987 (EVI e SAVI), 16/06/1990 (NDVI e VCI) e 15/05/1996 (SVI).

Tabela 54 – Matrizes de Covariância e de Correlação entre o Índice de Anomalia de Chuva (RAI) e Índices de vegetação.

Data	Matriz de Covariância *						Matriz de Correlação					
		EVI	NDVI	SAVI	SVI	VCI		EVI	NDVI	SAVI	SVI	VCI
28/11/1986	RAI	0,0094	0,0089	0,0056	0,0209	0,4058	RAI	0,1618	0,1286	0,1396	0,0528	0,1288
23/05/1987	RAI	0,0126	0,0112	0,0088	0,0273	0,8498	RAI	0,3007	0,2719	0,3171	0,1063	0,2829
24/06/1987	RAI	0,0012	0,0044	0,0013	0,0016	0,2135	RAI	0,0221	0,0678	0,0356	0,0053	0,0683
16/06/1990	RAI	0,0122	0,0130	0,0086	0,0226	0,8756	RAI	0,2002	0,1926	0,2025	0,0690	0,1976
17/12/1993	RAI	0,0013	0,0013	0,0010	-0,0098	0,0642	RAI	0,3982	0,2772	0,3979	-0,3296	0,2832
02/11/1994	RAI	0,0016	0,0026	0,0013	0,0041	0,2027	RAI	0,3397	0,4131	0,3411	0,1507	0,4167
15/05/1996	RAI	-0,0008	0,0027	0,0008	0,0638	0,1376	RAI	-0,0275	0,1128	0,0457	0,3339	0,1194
26/09/1998	RAI	0,0019	0,0030	0,0016	-0,0234	0,2001	RAI	0,2317	0,2568	0,2600	-0,3491	0,2798
28/10/1998	RAI	0,0014	0,0026	0,0011	-0,0213	0,2125	RAI	0,3285	0,3732	0,3099	-0,5005	0,3884
04/10/2001	RAI	0,0020	0,0030	0,0016	-0,0110	0,2413	RAI	0,2349	0,2462	0,2487	-0,1254	0,2481
06/07/2003	RAI	-0,0041	-0,0042	-0,0026	-0,0127	-0,2645	RAI	-0,2752	-0,2296	-0,2543	-0,1759	-0,2339
12/10/2004	RAI	0,0029	0,0032	0,0022	0,0028	0,2259	RAI	0,2104	0,1861	0,2192	0,0493	0,1847
15/10/2005	RAI	0,0034	0,0042	0,0027	-0,0063	0,2053	RAI	0,4244	0,4146	0,4554	-0,1771	0,4320
30/07/2006	RAI	-0,0245	-0,0245	-0,0170	-0,0961	-1,6599	RAI	-0,4984	-0,4488	-0,5051	-0,3903	-0,4562
22/01/2007	RAI	0,0020	0,0030	0,0013	0,0233	0,1904	RAI	0,2103	0,2536	0,2051	0,3311	0,2626
21/09/2008	RAI	0,0061	0,0069	0,0050	0,0157	0,4680	RAI	0,2184	0,1881	0,2313	0,1184	0,1936
24/09/2009	RAI	0,0086	0,0107	0,0070	0,0364	0,8090	RAI	0,4664	0,4467	0,4884	0,3841	0,4534
27/11/2009	RAI	-0,0018	-0,0015	-0,0012	-0,0169	-0,1067	RAI	-0,1109	-0,0772	-0,1025	-0,1501	-0,0741
29/08/2011	RAI	-0,0017	-0,0016	-0,0016	-0,0311	-0,1112	RAI	-0,0439	-0,0298	-0,0528	-0,1284	-0,0302

Fonte: A Autora (2020).

* Indica o tamanho da força da relação linear entre as variáveis analisadas.

A matriz de correlação do SPI x índices de vegetação (Tabela 55) permite inferir que apenas 5% dos dados apresentam correlação moderada com as variáveis EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI. Aliado a isso, os resultados revelaram que em média, 47% dos dados analisados possuem correlação inexistente, enquanto que 28% apresentam correlação baixa, 19% muito baixa e apenas 5% moderada.

A matriz de covariância do SPI revelou que os maiores graus de relação linear ocorreram com as variáveis EVI, NDVI e SAVI na data de 24/06/1987; e com a variável VCI na data de 02/11/1994, e para o SVI na data de 22/01/2007.

Tabela 55 – Matrizes de Covariância e de Correlação entre o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) e Índices de vegetação.

Data	Matriz de Covariância *						Matriz de Correlação					
		EVI	NDVI	SAVI	SVI	VCI		EVI	NDVI	SAVI	SVI	VCI
28/11/1986	SPI	0,0017	0,0021	0,0014	0,0035	0,0952	SPI	0,1500	0,1556	0,1831	0,0452	0,1559
23/05/1987	SPI	0,0033	0,0023	0,0021	0,0022	0,1738	SPI	0,2858	0,2043	0,2786	0,0312	0,2126
24/06/1987	SPI	0,0035	0,0034	0,0023	0,0122	0,1753	SPI	0,3191	0,2725	0,3085	0,2109	0,2875
16/06/1990	SPI	-0,0028	-0,0004	-0,0018	0,0046	-0,0245	SPI	-0,1408	-0,0167	-0,1338	0,0433	-0,0171
17/12/1993	SPI	0,0004	0,0005	0,0003	-0,0304	0,0242	SPI	0,0410	0,0330	0,0341	-0,3216	0,0337
02/11/1994	SPI	0,00156	0,00283	0,0013	0,00334	0,2204	SPI	0,2328	0,3070	0,2387	0,0847	0,3097
15/05/1996	SPI	0,0025	0,0021	0,0018	0,0050	0,1041	SPI	0,2212	0,2025	0,2320	0,0617	0,2144
26/09/1998	SPI	-0,0003	-0,0003	-0,0003	0,0027	-0,0177	SPI	-0,1629	-0,0987	-0,1968	0,1744	-0,1076
28/10/1998	SPI	-0,0002	-0,0002	-0,0002	0,0033	-0,0138	SPI	-0,1310	-0,0626	-0,1442	0,1997	-0,0651
04/10/2001	SPI	0,0001	0,0006	0,0001	0,0065	0,0467	SPI	0,0554	0,1742	0,0338	0,2701	0,1755
06/07/2003	SPI	-0,0010	-0,0010	-0,0009	-0,0003	-0,0626	SPI	-0,1758	-0,1390	-0,2125	-0,0099	-0,1416
12/10/2004	SPI	-0,0012	-0,0010	-0,0009	-0,0011	-0,0748	SPI	-0,1963	-0,1460	-0,2147	-0,0434	-0,1449
15/10/2005	SPI	-0,0001	0,0000	-0,0002	0,0015	-0,0014	SPI	-0,0279	-0,0049	-0,0520	0,0738	-0,0051
30/07/2006	SPI	-0,0018	-0,0016	-0,0013	-0,0074	-0,1072	SPI	-0,1834	-0,1448	-0,1919	-0,1508	-0,1472
22/01/2007	SPI	0,0010	0,0017	0,0007	0,0147	0,1070	SPI	0,1559	0,2065	0,1460	0,3031	0,2139
21/09/2008	SPI	0,0000	0,0000	-0,0001	-0,0009	0,0022	SPI	-0,0070	0,0044	-0,0277	-0,0336	0,0046
24/09/2009	SPI	-0,0008	-0,0009	-0,0007	-0,0050	-0,0617	SPI	-0,1288	-0,1101	-0,1510	-0,1646	-0,1073
27/11/2009	SPI	0,0003	0,0007	0,0002	0,0073	0,0472	SPI	0,0557	0,0910	0,0434	0,1713	0,0873
29/08/2011	SPI	-0,0012	-0,0015	-0,0010	-0,0101	-0,1095	SPI	-0,1897	-0,1882	-0,2019	-0,2662	-0,1911

Fonte: A Autora (2020).

* Indica o tamanho da força da relação linear entre as variáveis analisadas.

A matriz de correlação entre o PDSI e os índices de vegetação pode ser verificada na Tabela 56, cuja anotação sugere a existência de somente 11% de correlação moderada com todas as variáveis estudadas (EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI). A interpretação dos resultados da matriz de correlação também permite inferir que em média 41% dos valores possuem correlação classificada como inexistente, ao passo que 29% são baixas, 19% muito baixas e 11% do tipo moderada.

Além disso, a matriz de covariância do PDSI destaca que há forte grau de relação linear nas datas de 23/05/1987 para as variáveis EVI, SAVI e VCI, e em 24/06/1987 para os componentes NDVI e SVI.

Tabela 56 – Matrizes de Covariância e de Correlação entre o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e Índices de vegetação.

Data	Matriz de Covariância *						Matriz de Correlação					
		EVI	NDVI	SAVI	SVI	VCI		EVI	NDVI	SAVI	SVI	VCI
28/11/1986	PDSI	0,1545	0,1378	0,1038	-0,1604	6,2908	PDSI	0,1344	0,1011	0,1308	-0,0205	0,1013
23/05/1987	PDSI	0,5270	0,5625	0,3592	0,6566	42,6672	PDSI	0,3595	0,3899	0,3716	0,0731	0,4058
24/06/1987	PDSI	0,4797	0,6106	0,3366	1,7201	32,5957	PDSI	0,3684	0,4055	0,3828	0,2484	0,4449
16/06/1990	PDSI	0,2575	0,3737	0,1826	1,6949	25,1113	PDSI	0,1225	0,1603	0,1252	0,1500	0,1644
17/12/1993	PDSI	0,0389	0,0873	0,0278	0,4868	4,3547	PDSI	0,0657	0,1060	0,0642	0,0923	0,1083
02/11/1994	PDSI	-0,05064	0,00033	-0,04112	0,11437	0,02582	PDSI	-0,0866	0,0004	-0,0869	0,0333	0,0004
15/05/1996	PDSI	0,2016	0,0370	0,1157	0,0326	1,8592	PDSI	0,2476	0,0507	0,2112	0,0057	0,0537
26/09/1998	PDSI	-0,0038	0,0000	-0,0007	0,2874	-0,0030	PDSI	-0,0387	-0,0003	-0,0102	0,3551	-0,0004
28/10/1998	PDSI	0,0046	0,0003	0,0004	0,1262	0,0280	PDSI	0,0585	0,0027	0,0054	0,1648	0,0029
04/10/2001	PDSI	0,0283	0,0474	0,0221	0,1595	3,8166	PDSI	0,1945	0,2231	0,1970	0,1044	0,2247
06/07/2003	PDSI	-0,0787	-0,0463	-0,0437	-0,1010	-2,9229	PDSI	-0,2220	-0,1066	-0,1769	-0,0588	-0,1086
12/10/2004	PDSI	-0,0303	-0,0384	-0,0231	-0,0567	-2,7524	PDSI	-0,2267	-0,2354	-0,2352	-0,1024	-0,2337
15/10/2005	PDSI	0,0040	0,0207	-0,0007	-0,0033	1,0100	PDSI	0,0133	0,0544	-0,0033	-0,0025	0,0566
30/07/2006	PDSI	-0,3463	-0,3584	-0,2391	-1,3167	-24,2998	PDSI	-0,5054	-0,4715	-0,5104	-0,3839	-0,4793
22/01/2007	PDSI	0,1143	0,1549	0,0790	0,9892	9,7115	PDSI	0,2604	0,2782	0,2594	0,3023	0,2881
21/09/2008	PDSI	-0,0528	-0,0685	-0,0441	-0,1964	-4,6822	PDSI	-0,1070	-0,1060	-0,1152	-0,0832	-0,1091
24/09/2009	PDSI	0,1140	0,1558	0,0919	0,3761	11,7081	PDSI	0,1336	0,1406	0,1387	0,0858	0,1418
27/11/2009	PDSI	-0,0170	-0,0105	-0,0105	-0,1451	-0,7265	PDSI	-0,0890	-0,0432	-0,0734	-0,1057	-0,0415
29/08/2011	PDSI	-0,1077	-0,1186	-0,0844	-0,3187	-8,4424	PDSI	-0,1755	-0,1461	-0,1769	-0,0849	-0,1483

Fonte: A Autora (2020).

* Indica o tamanho da força da relação linear entre as variáveis analisadas.

A interpretação da matriz da correlação do MIA x índices de vegetação (Tabela 57) demonstra que há correlação alta de 16%, 11% e 16%, respectivamente para os componentes EVI, NDVI, SAVI e VCI. Aliado a isso, nota-se também a ocorrência de correlação moderada de 37% (EVI), 47% (NDVI), 42% (SAVI), 21% (SVI) e 42% (VCI).

Isso implica dizer que em média, tem-se correlações do tipo inexistente em 8% dos dados, baixa em 31%, muito baixa em 12%, moderada em 38% e alta em 12% de toda a série analisada (1986-2011).

Ademais, a matriz de covariância do MIA evidenciou que os maiores graus de relação linear foram identificados na data de 16/06/1990 para todas as variáveis estudadas (EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI).

Tabela 57 – Matrizes de Covariância e de Correlação entre o Índice de Aridez de Martonne (MIA) e Índices de vegetação.

Data	Matriz de Covariância *						Matriz de Correlação					
		EVI	NDVI	SAVI	SVI	VCI		EVI	NDVI	SAVI	SVI	VCI
28/11/1986	MIA	0,0553	0,0573	0,0369	0,1314	2,6184	MIA	0,2253	0,1972	0,2182	0,0789	0,1975
23/05/1987	MIA	0,0941	0,0834	0,0656	0,0637	6,3237	MIA	0,3586	0,3228	0,3793	0,0396	0,3360
24/06/1987	MIA	0,0383	0,0477	0,0269	0,0889	2,4471	MIA	0,2786	0,3002	0,2895	0,1216	0,3163
16/06/1990	MIA	0,1075	0,1099	0,0753	0,2190	7,3819	MIA	0,4088	0,3768	0,4124	0,1549	0,3864
17/12/1993	MIA	0,0063	0,0041	0,0048	-0,0335	0,2046	MIA	0,2554	0,1200	0,2647	-0,1531	0,1226
02/11/1994	MIA	0,0062	0,0092	0,0052	0,0030	0,7184	MIA	0,4270	0,4647	0,4435	0,0352	0,4689
15/05/1996	MIA	0,0239	0,0115	0,0161	-0,0161	0,5781	MIA	0,1933	0,1039	0,1933	-0,0184	0,1100
26/09/1998	MIA	0,0022	0,0036	0,0017	-0,0285	0,2401	MIA	0,2869	0,3263	0,3047	-0,4497	0,3556
28/10/1998	MIA	0,0016	0,0030	0,0014	-0,0308	0,2539	MIA	0,2316	0,2868	0,2452	-0,4640	0,2985
04/10/2001	MIA	0,0009	0,0001	0,0014	-0,1533	0,0073	MIA	0,0318	0,0022	0,0609	-0,5064	0,0022
06/07/2003	MIA	0,0110	0,0117	0,0079	0,0275	0,7402	MIA	0,4527	0,3929	0,4640	0,2329	0,4003
12/10/2004	MIA	0,0086	0,0093	0,0067	0,0178	0,6636	MIA	0,3254	0,2876	0,3463	0,1625	0,2855
15/10/2005	MIA	0,0044	0,0055	0,0036	-0,0087	0,2693	MIA	0,3657	0,3621	0,3981	-0,1621	0,3773
30/07/2006	MIA	0,0399	0,0409	0,0272	0,1640	2,7715	MIA	0,4943	0,4560	0,4930	0,4054	0,4635
22/01/2007	MIA	0,0107	0,0133	0,0085	-0,0719	0,8352	MIA	0,1562	0,1530	0,1787	-0,1406	0,1585
21/09/2008	MIA	0,0148	0,0185	0,0118	0,0458	1,2624	MIA	0,5196	0,4945	0,5323	0,3355	0,5090
24/09/2009	MIA	0,0105	0,0133	0,0084	0,0425	1,0094	MIA	0,5963	0,5791	0,6109	0,4688	0,5909
27/11/2009	MIA	0,0013	0,0003	0,0016	-0,0565	0,0234	MIA	0,0230	0,0046	0,0362	-0,1366	0,0044
29/08/2011	MIA	0,0230	0,0295	0,0178	0,0970	2,0997	MIA	0,5647	0,5486	0,5638	0,3903	0,5569

Fonte: A Autora (2020).

* Indica o tamanho da força da relação linear entre as variáveis analisadas.

A matriz de correlação do AI e dos índices de vegetação exibida na Tabela 58 permite concluir que há 16%, 11%, 16% e 16% de correlações classificadas como alta para as variáveis EVI, NDVI, SAVI e VCI, respectivamente. Os dados também denotam que há correlações do tipo moderada para cerca de 37%, 47%, 42%, 21% e 42% dos valores das variáveis EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI, simultaneamente.

Aliado a isso, tem-se que em média 8% das correlações do AI com as variáveis EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI são tidas como inexistentes, enquanto que 31% são baixas, 12% são muito baixas, 38% são moderadas e 12% são altas. A matriz de covariância do AI destaca que os maiores graus de relação linear foram detectados na data de 16/06/1990 para os componentes EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI.

Tabela 58 – Matrizes de Covariância e de Correlação entre o Índice de Aridez de Thornthwaite (AI) e Índices de vegetação.

Data	Matriz de Covariância *						Matriz de Correlação					
		EVI	NDVI	SAVI	SVI	VCI		EVI	NDVI	SAVI	SVI	VCI
28/11/1986	AI	0,0880	0,0914	0,0588	0,2093	4,1711	AI	0,2253	0,1972	0,2182	0,0789	0,1975
23/05/1987	AI	0,2161	0,1914	0,1507	0,1462	14,5194	AI	0,3586	0,3228	0,3793	0,0396	0,3360
24/06/1987	AI	0,0999	0,1245	0,0701	0,2320	6,3838	AI	0,2786	0,3002	0,2895	0,1216	0,3163
16/06/1990	AI	0,2790	0,2851	0,1953	0,5684	19,1590	AI	0,4088	0,3768	0,4124	0,1549	0,3864
17/12/1993	AI	0,0096	0,0063	0,0073	-0,0514	0,3140	AI	0,2554	0,1200	0,2647	-0,1531	0,1226
02/11/1994	AI	0,0098	0,0146	0,0082	0,0048	1,1405	AI	0,4270	0,4647	0,4435	0,0352	0,4689
15/05/1996	AI	0,0502	0,0241	0,0338	-0,0337	1,2132	AI	0,1933	0,1039	0,1933	-0,0184	0,1100
26/09/1998	AI	0,0038	0,0063	0,0030	-0,0491	0,4139	AI	0,2869	0,3263	0,3047	-0,4497	0,3556
28/10/1998	AI	0,0025	0,0048	0,0021	-0,0482	0,3979	AI	0,2316	0,2868	0,2452	-0,4640	0,2985
04/10/2001	AI	0,0015	0,0001	0,0021	-0,2416	0,0115	AI	0,0318	0,0022	0,0609	-0,5064	0,0022
06/07/2003	AI	0,0230	0,0244	0,0164	0,0572	1,5416	AI	0,4527	0,3929	0,4640	0,2329	0,4003
12/10/2004	AI	0,0136	0,0146	0,0106	0,0280	1,0467	AI	0,3254	0,2876	0,3463	0,1625	0,2855
15/10/2005	AI	0,0070	0,0087	0,0056	-0,0137	0,4246	AI	0,3657	0,3621	0,3981	-0,1621	0,3773
30/07/2006	AI	0,0994	0,1018	0,0678	0,4082	6,8984	AI	0,4943	0,4560	0,4930	0,4054	0,4635
22/01/2007	AI	0,0165	0,0205	0,0131	-0,1105	1,2837	AI	0,1562	0,1530	0,1787	-0,1406	0,1585
21/09/2008	AI	0,0257	0,0321	0,0205	0,0794	2,1902	AI	0,5196	0,4945	0,5323	0,3355	0,5090
24/09/2009	AI	0,0181	0,0228	0,0144	0,0731	1,7353	AI	0,5963	0,5791	0,6109	0,4688	0,5909
27/11/2009	AI	0,0021	0,0005	0,0025	-0,0900	0,0372	AI	0,0230	0,0046	0,0362	-0,1366	0,0044
29/08/2011	AI	0,0422	0,0542	0,0327	0,1782	3,8579	AI	0,5647	0,5486	0,5638	0,3903	0,5569

Fonte: A Autora (2020).

* Indica o tamanho da força da relação linear entre as variáveis analisadas.

A descrição da matriz de correlação entre o AI_{ASD} x índices de vegetação apresentada na Tabela 59 permite deduzir que 16% das correlações são tidas como altas para as variáveis EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI. Ademais, os resultados demonstram a existência de correlações do tipo moderada para 37%, 47%, 42%, 21% e 47% dos valores de EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI, respectivamente.

Em suma, tem-se em média, para todo o período estudado (1986-2011), a ocorrência de 14% de correlações do tipo inexistentes, 15% de correlações baixas, 12% de muito baixas, 13% de moderadas e 4% de altas.

A matriz de covariância do AI_{ASD} exhibe que os maiores valores de relação linear ocorreram na data de 16/06/1990 para todas as variáveis dos índices de vegetação analisados.

Tabela 59 – Matrizes de Covariância e de Correlação entre o Índice de Aridez de Áreas Suscetíveis a Desertificação (AI_{ASD}) e Índices de vegetação.

Data	Matriz de Covariância *						Matriz de Correlação					
		EVI	NDVI	SAVI	SVI	VCI		EVI	NDVI	SAVI	SVI	VCI
28/11/1986	AI _{ASD}	0,0009	0,0009	0,0006	0,0023	0,0428	AI _{ASD}	0,2283	0,2008	0,2207	0,0842	0,2011
23/05/1987	AI _{ASD}	0,0022	0,0019	0,0015	0,0014	0,1457	AI _{ASD}	0,3597	0,3242	0,3804	0,0385	0,3374
24/06/1987	AI _{ASD}	0,0010	0,0013	0,0007	0,0024	0,0653	AI _{ASD}	0,2804	0,3029	0,2915	0,1228	0,3190
16/06/1990	AI _{ASD}	0,0028	0,0029	0,0020	0,0057	0,1912	AI _{ASD}	0,4090	0,3768	0,4126	0,1562	0,3865
17/12/1993	AI _{ASD}	0,0001	0,0001	0,0001	-0,0005	0,0037	AI _{ASD}	0,2631	0,1344	0,2707	-0,1371	0,1373
02/11/1994	AI _{ASD}	0,0001	0,0002	0,0001	0,0000	0,0120	AI _{ASD}	0,4361	0,4654	0,4509	0,0344	0,4696
15/05/1996	AI _{ASD}	0,0005	0,0002	0,0003	-0,0004	0,0119	AI _{ASD}	0,1903	0,1014	0,1905	-0,0204	0,1074
26/09/1998	AI _{ASD}	0,0000	0,0001	0,0000	-0,0005	0,0042	AI _{ASD}	0,2902	0,3246	0,3097	-0,4385	0,3537
28/10/1998	AI _{ASD}	0,0000	0,0001	0,0000	-0,0005	0,0044	AI _{ASD}	0,2396	0,3006	0,2523	-0,4703	0,3129
04/10/2001	AI _{ASD}	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0025	-0,0001	AI _{ASD}	0,0262	-0,0026	0,0550	-0,5062	-0,0026
06/07/2003	AI _{ASD}	0,0003	0,0003	0,0002	0,0006	0,0168	AI _{ASD}	0,4585	0,3982	0,4715	0,2315	0,4056
12/10/2004	AI _{ASD}	0,0001	0,0001	0,0001	0,0003	0,0106	AI _{ASD}	0,3145	0,2805	0,3346	0,1590	0,2785
15/10/2005	AI _{ASD}	0,0001	0,0001	0,0001	-0,0002	0,0049	AI _{ASD}	0,3738	0,3727	0,4064	-0,1597	0,3883
30/07/2006	AI _{ASD}	0,0010	0,0010	0,0007	0,0041	0,0693	AI _{ASD}	0,4973	0,4590	0,4958	0,4068	0,4666
22/01/2007	AI _{ASD}	0,0002	0,0002	0,0001	-0,0011	0,0129	AI _{ASD}	0,1566	0,1538	0,1794	-0,1369	0,1593
21/09/2008	AI _{ASD}	0,0003	0,0003	0,0002	0,0008	0,0222	AI _{ASD}	0,5265	0,5030	0,5403	0,3408	0,5178
24/09/2009	AI _{ASD}	0,0002	0,0002	0,0001	0,0007	0,0171	AI _{ASD}	0,5940	0,5734	0,6087	0,4651	0,5847
27/11/2009	AI _{ASD}	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0010	-0,0005	AI _{ASD}	0,0165	-0,0054	0,0301	-0,1402	-0,0052
29/08/2011	AI _{ASD}	0,0004	0,0005	0,0003	0,0017	0,0364	AI _{ASD}	0,5512	0,5345	0,5498	0,3745	0,5426

Fonte: A Autora (2020).

* Indica o tamanho da força da relação linear entre as variáveis analisadas.

Diante dos dados de correlação espacial supracitados é possível dizer que os índices de aridez (MIA, AI e AI_{ASD}) obtiveram melhores correlações espaciais com os índices de vegetação obtidos por meio de sensoriamento remoto, quando comparados aos índices de seca (RAI, SPI e PDSI).

Isso sugere que o monitoramento da seca, assim como, da aridez e da susceptibilidade a desertificação pode ser desempenhado pelo emprego de ambos os métodos (índices de aridez e de vegetação), haja vista, que as correlações espaciais entre esses índices apresentaram bons resultados. Aliado a isso, esses resultados indicam que na ausência de dados *in loco*, para a estimativa de índices físicos é possível o emprego de ferramentas de sensoriamento remoto, sem que haja a perda da confiabilidade dos resultados, haja vista a existência de boas correlações entre essas variáveis.

A utilização de métodos alternativos, como os de sensoriamento remoto para o monitoramento dos eventos hidrológicos extremos, assim como, da desertificação

e dos efeitos relacionados a mudanças climáticas, se tornam cruciais, principalmente em locais cuja disponibilidade de acervo de dados climatológicos seja limitada, por conta de falta de equipamento, pessoal especializado nos órgãos gestores, e/ou de séries descontínuas, e/ou com falhas, não sendo possível o seu uso.

Diante disso, diversos autores ao redor do mundo vêm procurando estudar a existência dessas correlações, a exemplo de Javed *et al.* (2019), Dikbas e Bacanlı (2020), Livada e Assimakopoulos (2007), que empregaram o uso de índices de seca como SPI, VCI e NDVI e detectaram a existência de correlação com anomalias de precipitação em diferentes tipos de cobertura de terra.

Além destes, vários autores no Brasil, como Gurgel *et al.* (2003), Leivas *et al.* (2014) e Freires *et al.* (2019) também vem estudando o monitoramento da seca através de índices de sensoriamento remoto, como NDVI, SVI, dentre outros.

5.9 CORRELAÇÃO PONTUAL

As análises de regressão e seus coeficientes de determinação (R^2) para cada uma das correlações pontuais entre os índices de seca x índices de vegetação, e índices de aridez x índices de vegetação podem ser verificados no Apêndice D e Apêndice E, respectivamente.

A partir da análise dos dados de correlação pontual do RAI (Tabela 60), é possível dizer que cerca de 9% das correlações entre a variável EVI são perfeitas, enquanto que no NDVI são 36%, no SAVI são 9%, no SVI são 18% e no VCI são 27%. Os dados também mostram que em média 20% das correlações entre a variável RAI e os componentes de vegetação (EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI) apresentam ajustes classificados como fortíssimo.

Tabela 60 – Coeficiente de determinação (R^2) obtido na correlação pontual entre o Índice de Anomalia de Chuva (RAI) e os Índices de vegetação.

Data da imagem	RAI x EVI	RAI x NDVI	RAI x SAVI	RAI x SVI	RAI x VCI
28/11/1986	0,4567	0,6796	0,4749	0,5796	0,6796
23/05/1987	0,1193	0,1650	0,1232	0,0178	0,1650
24/06/1987	0,6929	0,4442	0,7301	0,6938	0,4442
16/06/1990	0,9723	0,9836	0,9713	0,6063	0,9836
17/12/1993	0,9077	0,9836	0,9279	0,7728	0,7547
02/11/1994	0,8607	0,8617	0,7740	0,0872	0,8617
15/05/1996	0,6702	0,8852	0,7999	0,5054	0,8852
26/09/1998	0,4148	0,7541	0,4967	0,7915	0,7541
28/10/1998	0,9759	0,9660	0,9736	0,9878	0,9660
04/10/2001	0,4120	0,2627	0,4245	0,4036	0,2627
06/07/2003	0,2811	0,2428	0,2952	0,3071	0,2428
12/10/2004	0,9304	0,9526	0,9170	0,8921	0,9526
15/10/2005	0,9801	0,9827	0,9876	0,9943	0,9827
30/07/2006	0,3424	0,3023	0,3467	0,3210	0,3023
22/01/2007	0,0962	0,1252	0,0557	0,1317	0,1252
21/09/2008	0,4963	0,6500	0,4735	0,4656	0,6500
24/09/2009	0,5103	0,6107	0,4516	0,3225	0,6107
27/11/2009	0,9570	0,9829	0,9449	0,3423	0,9829
29/08/2011	0,9919	0,9203	0,9354	0,9391	0,9203

Fonte: A Autora (2020).

Os coeficientes de determinação obtidos através das análises de regressão do SPI com os índices de vegetação podem ser observados na Tabela 61. Os resultados apontam a ocorrência de 24%, 21%, 24%, 11% e 21% de ajustes classificados como fortíssimo entre os componentes SPI e as variáveis EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI, respectivamente.

Aliado a isso, verifica-se que em média aproximadamente 20% dos ajustes das equações são categorizadas como forte e média para todos os índices de vegetação estudados.

Os menores ajustes observados aconteceram nas datas de 29/08/2011 (EVI), 26/09/1998 (NDVI), 16/06/1990 (SAVI), 02/11/1994 (SVI) e 26/09/1998 (VCI).

Tabela 61 – Coeficiente de determinação (R^2) obtido na correlação pontual entre o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) e os Índices de vegetação.

Data da imagem	SPI x EVI	SPI x NDVI	SPI x SAVI	SPI x SVI	SPI x VCI
28/11/1986	0,6992	0,4960	0,6346	0,4404	0,4960
23/05/1987	0,9451	0,9184	0,9603	0,7469	0,9184
24/06/1987	0,9506	0,9914	0,8860	0,4360	0,9914
16/06/1990	0,4384	0,6492	0,3599	0,9450	0,6492
17/12/1993	0,6066	0,6748	0,5603	0,9592	0,6748
02/11/1994	0,8558	0,8936	0,8751	0,0948	0,8936
15/05/1996	0,9900	0,9914	0,9900	0,9900	0,9900
26/09/1998	0,6559	0,3135	0,4265	0,8036	0,3135
28/10/1998	0,8271	0,3373	0,9134	0,5510	0,3373
04/10/2001	0,5994	0,7335	0,5470	0,7525	0,7335
06/07/2003	0,6205	0,6337	0,6298	0,7946	0,6337
12/10/2004	0,9208	0,7600	0,9752	0,4271	0,7600
15/10/2005	0,9281	0,9481	0,9083	0,9999	0,9481
30/07/2006	0,7965	0,8412	0,7675	0,8555	0,8412
22/01/2007	0,8690	0,9304	0,8354	0,8979	0,9304
21/09/2008	0,9775	0,9716	0,9754	0,4440	0,9716
24/09/2009	0,8951	0,9126	0,8603	0,6764	0,9126
27/11/2009	0,8070	0,8346	0,7093	0,1899	0,8346
29/08/2011	0,3016	0,3195	0,4038	0,5742	0,3195

Fonte: A Autora (2020).

Os coeficientes de determinação observados nas correlações pontuais entre o PDSI e os índices de vegetação (Tabela 62) permitiram inferir que 29%, 24%, 18%, 6% e 24% das equações para EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI, respectivamente obtiveram ajustes categorizados como fortíssimo. Esses dados também indicam que em média 20% de todas as equações analisadas no período de 1986-2011 são classificadas como forte ou média.

Além disso, também é possível identificar que os menores ajustes ocorreram nas datas de 28/10/1998 (EVI e SAVI), 29/08/2011 (NDVI e VCI) e 30/07/2006 (SVI).

Tabela 62 – Coeficiente de determinação (R^2) obtido na correlação pontual entre o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e os Índices de vegetação.

Data da imagem	PDSI x EVI	PDSI x NDVI	PDSI x SAVI	PDSI x SVI	PDSI x VCI
28/11/1986	0,5920	0,6361	0,6387	0,6615	0,6361
23/05/1987	0,8698	0,7755	0,8676	0,1713	0,7755
24/06/1987	0,8799	0,8968	0,8804	0,9452	0,8968
16/06/1990	0,3176	0,1984	0,3445	0,6494	0,1984
17/12/1993	0,3845	0,2631	0,3615	0,7287	0,2631
02/11/1994	0,6149	0,2180	0,1020	0,2978	0,2180
15/05/1996	0,5940	0,6136	0,6190	0,5677	0,6136
26/09/1998	0,2408	0,3354	0,2840	0,2672	0,3354
28/10/1998	0,0983	0,8262	0,0386	0,4896	0,8262
04/10/2001	0,9272	0,7896	0,6693	0,7193	0,7896
06/07/2003	0,3995	0,4134	0,3651	0,7130	0,4134
12/10/2004	0,5283	0,5151	0,5450	0,3239	0,5151
15/10/2005	0,3709	0,2695	0,4169	0,4572	0,2695
30/07/2006	0,1668	0,2894	0,1301	0,1238	0,2894
22/01/2007	0,7519	0,6823	0,7695	0,5642	0,6823
21/09/2008	0,9900	0,9900	0,9900	0,9900	0,9900
24/09/2009	0,8906	0,8909	0,8567	0,7486	0,8909
27/11/2009	0,9778	0,9617	0,9909	0,5476	0,9617
29/08/2011	0,2129	0,0338	0,2656	0,2761	0,0338

Fonte: A Autora (2020).

As equações das correlações pontuais entre o MIA e os índices de vegetação (Tabela 63) revelam que 22%, 28%, 17%, 6% e 28% dos coeficientes foram classificados como perfeita para as variáveis EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI, respectivamente.

Além disso, a interpretação dos dados sugere que cerca de 20% de todos os valores dos coeficientes de determinação, no período de 1986-2011, foram classificados como forte ou média.

No intervalo estudado verificou-se que algumas correlações não obtiveram um ajuste adequado como os ocorridos nas datas 04/10/2001 para o EVI, e 15/05/1996 para as demais variáveis dos índices de vegetação (NDVI, SAVI, SVI e VCI)

Tabela 63 – Coeficiente de determinação (R^2) obtido na correlação pontual entre o Índice de Aridez de Martonne (MIA) e os Índices de vegetação.

Data da imagem	MIA x EVI	MIA x NDVI	MIA x SAVI	MIA x SVI	MIA x VCI
28/11/1986	0,6624	0,7235	0,7152	0,6241	0,7235
23/05/1987	0,7186	0,6748	0,7053	0,5576	0,6748
24/06/1987	0,3811	0,5579	0,3926	0,5997	0,5579
16/06/1990	0,9595	0,9644	0,9736	0,9178	0,9644
17/12/1993	0,7991	0,8940	0,7799	0,9667	0,8940
02/11/1994	0,9782	0,9624	0,9556	0,3071	0,9624
15/05/1996	0,3285	0,1422	0,2508	0,0800	0,1422
26/09/1998	0,9952	0,9993	0,9703	0,9618	0,9993
28/10/1998	0,9866	0,9905	0,9915	0,9689	0,9905
04/10/2001	0,3213	0,1863	0,4327	0,8150	0,1863
06/07/2003	0,9474	0,9245	0,9641	0,9135	0,9245
12/10/2004	0,9882	0,9892	0,9924	0,9383	0,9892
15/10/2005	0,9679	0,9811	0,9713	0,9884	0,9811
30/07/2006	0,4739	0,5855	0,4496	0,9611	0,5855
22/01/2007	0,8596	0,9115	0,8440	0,9531	0,9115
21/09/2008	0,9976	0,9999	0,9934	0,9588	0,9999
24/09/2009	0,9521	0,9770	0,9470	0,9029	0,9770
27/11/2009	0,7404	0,6671	0,6610	0,5759	0,6671
29/08/2011	0,9666	0,9378	0,9685	0,9299	0,9378

Fonte: A Autora (2020).

A interpretação das correlações pontuais do AI (Tabela 64) indicaram a ocorrência de correlações perfeita em 22%, 28%, 17%, 6% e 28% dos valores para as variáveis EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI, respectivamente, no período de 1986-2011. Os resultados também demonstraram que em média 20% dos ajustes das correlações são tidas como fortíssimas e 20% são fortes. Sugerindo que nesses casos há uma correlação entre ambas as variáveis analisadas, ou seja, de seca e de aridez x de vegetação.

Ademais os dados encontrados também demonstraram que os menores ajustes da equação para o AI ocorreram nas datas de 04/10/2001 para o EVI, e 15/05/1996 para as demais variáveis (NDVI, SAVI, SVI e VCI).

Tabela 64 – Coeficiente de determinação (R^2) obtido na correlação pontual entre o Índice de Aridez de Thornthwaite (AI) e os Índices de vegetação.

Data da imagem	AI x EVI	AI x NDVI	AI x SAVI	AI x SVI	AI x VCI
28/11/1986	0,6624	0,7235	0,7152	0,6241	0,7235
23/05/1987	0,7186	0,6748	0,7053	0,5576	0,6748
24/06/1987	0,3811	0,5579	0,3926	0,5997	0,5579
16/06/1990	0,9595	0,9644	0,9736	0,9178	0,9644
17/12/1993	0,7991	0,8940	0,7799	0,9667	0,8940
02/11/1994	0,9782	0,9624	0,9556	0,3071	0,9624
15/05/1996	0,3285	0,1422	0,2508	0,0800	0,1422
26/09/1998	0,9952	0,9993	0,9703	0,9618	0,9993
28/10/1998	0,9866	0,9905	0,9915	0,9689	0,9905
04/10/2001	0,3213	0,1863	0,4327	0,8150	0,1863
06/07/2003	0,9474	0,9245	0,9641	0,9135	0,9245
12/10/2004	0,9882	0,9892	0,9924	0,9383	0,9892
15/10/2005	0,9679	0,9811	0,9713	0,9884	0,9811
30/07/2006	0,4739	0,5855	0,4496	0,9611	0,5855
22/01/2007	0,8596	0,9115	0,8440	0,9531	0,9115
21/09/2008	0,9976	0,9999	0,9934	0,9588	0,9999
24/09/2009	0,9521	0,9770	0,9470	0,9029	0,9770
27/11/2009	0,7404	0,6671	0,6610	0,5759	0,6671
29/08/2011	0,9666	0,9378	0,9685	0,9299	0,9378

Fonte: A Autora (2020).

Os resultados das análises de correlação pontual entre o métodos AI_{ASD} e os índices de vegetação (Tabela 65) sugerem que 18%, 23%, 18%, 18% e 23% dos coeficientes de determinação são classificados como ajuste perfeito para as variáveis EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI, simultaneamente.

Ademais, os dados apontam que em média 20% das equações de todo o intervalo estudado (1986-2011) apresentou coeficiente de determinação classificado como fortíssimo ou forte.

Na análise também se observou que o menor ajuste de equação para o AI_{ASD} aconteceu na data 15/05/1996 para todas as variáveis de vegetação (EVI, NDVI, SAVI, SVI e VCI).

Tabela 65 – Coeficiente de determinação (R^2) obtido na correlação pontual entre o Índice de Aridez de Áreas Suscetíveis a Desertificação (AI_{ASD}) e os Índices de vegetação.

Data da imagem	AI_{ASD} X EVI	AI_{ASD} X NDVI	AI_{ASD} X SAVI	AI_{ASD} X SVI	AI_{ASD} X VCI
28/11/1986	0,6564	0,7168	0,7097	0,6223	0,7168
23/05/1987	0,7211	0,6776	0,7077	0,5605	0,6776
24/06/1987	0,4149	0,5379	0,4219	0,5431	0,5379
16/06/1990	0,9597	0,9645	0,9737	0,9177	0,9645
17/12/1993	0,9566	0,9581	0,9523	0,9750	0,9581
02/11/1994	0,9072	0,7900	0,9202	0,5976	0,7900
15/05/1996	0,2681	0,1099	0,1975	0,0899	0,1099
26/09/1998	0,9855	0,9695	0,9911	0,9998	0,9695
28/10/1998	0,9894	0,9881	0,9946	0,9513	0,9881
04/10/2001	0,3167	0,1778	0,4323	0,8030	0,1778
06/07/2003	0,8801	0,8377	0,9089	0,9036	0,8377
12/10/2004	0,9779	0,9806	0,9780	0,9922	0,9806
15/10/2005	0,9683	0,9810	0,9712	0,9829	0,9810
30/07/2006	0,3688	0,4676	0,3379	0,6889	0,4676
22/01/2007	0,6598	0,7065	0,6313	0,9953	0,7065
21/09/2008	0,9857	0,9864	0,9873	0,9571	0,9864
24/09/2009	0,9860	0,9946	0,9812	0,9009	0,9946
27/11/2009	0,7863	0,7162	0,7021	0,6405	0,7162
29/08/2011	0,8754	0,7289	0,8714	0,4283	0,7289

Fonte: A Autora (2020).

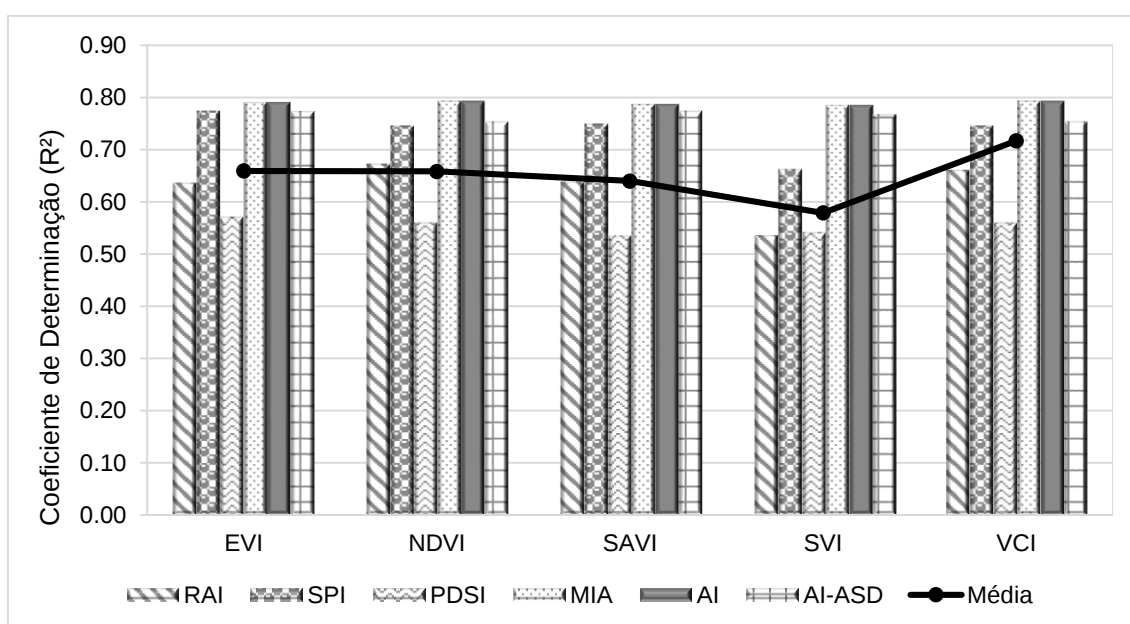
Os resultados acima apresentados indicam que os índices de aridez (MIA , AI e AI_{ASD}) apresentaram melhor ajuste das equações na correlação pontual com os índices de vegetação, quando comparados aos índices de seca (RAI , SPI e $PDSI$), exibindo coeficientes de determinação que se mantiveram classificados como fortíssima, forte e média ao longo do período estudado (1986-2011), como pode ser observado na Figura 25.

Esses resultados são muito significativos pois recomendam que o emprego de índices de vegetação obtidos com o auxílio de técnicas de sensoriamento remoto pode ser utilizado como uma ferramenta alternativa, em casos que não sejam possíveis o emprego de índices físicos (seca e aridez) para o monitoramento da seca, por exemplo.

Isso permite que independente da disponibilidade de dados medidos *in situ* é possível efetuar o acompanhamento das condições naturais, seja eventos hidrológicos, seja desastres naturais, impactos das mudanças climáticas, dentre outros.

Tal premissa pode ser ratificada a partir de diversos estudos, como os desenvolvidos por Costa *et al.* (2019), que empregaram o NDVI para acompanhamento da biomassa de videiras em cultivo agrícola; Souto *et al.* (2019), que utilizaram técnicas de sensoriamento remoto e índices de seca como o SPI para avaliação de secas meteorológicas na Ilha do Marajó; Silva *et al.* (2019), que usou o SAVI e medições de IAF para avaliação da cobertura vegetal do bioma Caatinga no Estado do Ceará; e Peruzzo *et al.* (2019), cujo aplicaram geotecnologias para o monitoramento agrícola e ambiental da bacia do Alto Piranhas.

Figura 25 – Média histórica (1986-2011) do coeficiente de determinação (R^2) dos índices de Seca e Aridez x Índices de Vegetação.



Fonte: A Autora (2020).

6 CONCLUSÕES

De modo geral, nas análises dos índices de seca (RAI, PDSI e SPI) e de aridez (MIA, AI e AI_{ASD}) observou-se que no período de 1991-2016 houve um aumento no número de registros nas categorias que se referem a seca e aridez e uma diminuição dos valores categorizados como úmidos. Ou seja, houve a intensificação das secas e da aridez na região da bacia do rio Brígida, e, conseqüentemente aumento da susceptibilidade a desertificação ao longo dos anos.

Além disso, notou-se na avaliação de tendência climática dos índices de seca (RAI, PDSI e SPI) e de aridez (MIA, AI e AI_{ASD}) por meio do software TREND, a ocorrência de significância estatística entre os valores do período de 1991-2016 em comparação aos de 1961-1990, inferindo que os últimos anos da série histórica estão mais secos, e a aridez evoluindo.

Acredita-se que essas alterações constatadas se devem a redução da precipitação, associada a elevação de temperatura e de evapotranspiração, na região da bacia do rio São Francisco onde a área de estudo está situada. Esse fato é bastante preocupante, pois poderá contribuir consideravelmente, em médio e longo prazo para a aceleração de processo de desertificação, e conseqüentemente na perda de terras produtivas.

Tal constatação requer o monitoramento contínuo de eventos hidrológicos extremos, como secas e estiagens, assim como, o acompanhamento das mudanças climáticas que podem interferir de forma direta no ciclo hidrológico e conseqüentemente acelerar o processo de desertificação, em escala micro (bacia), ou escala macro (região, estado, país).

Nesse sentido, todos os métodos testados (RAI, PDSI, SPI, MIA, AI e AI_{ASD}) se apresentaram confiáveis do ponto de vista prático e estatístico para a avaliação da seca e da aridez na bacia do rio Brígida, assim como, análise da progressão da susceptibilidade à desertificação.

É importante frisar que do ponto de vista prático foram notadas algumas peculiaridades quando comparados os métodos entre si, como por exemplo, o RAI e o SPI exigem somente a precipitação, como dado de entrada. Em contrapartida, o PDSI exige uma ampla variedade de dados (chuva, evapotranspiração, recarga, umidade do solo, etc.) como dados de entrada; e o SPI requer uma série com período extenso, de no mínimo 30 anos. Aliado a isso, o MIA, AI e AI_{ASD} são facilmente estimados, contudo, os dois últimos requerem dados de

evapotranspiração que nem sempre estão disponíveis em acervo de dados climáticos.

Do ponto de vista estatístico, verificou-se que o RAI e o PDSI se mostraram mais apropriados à análise da seca, enquanto que o AI demonstrou melhor ajuste para análise da aridez e da susceptibilidade a desertificação na bacia do rio Brígida.

Com relação aos índices de vegetação obtidos por meio de sensoriamento remoto também foi notada a diminuição da condição de vegetação na média histórica (1986-2011) podendo-se inferir que a reiterada ocorrência de secas na região está impactando a cobertura vegetal. Comportamento este que também foi notado na análise de tendência climática por meio do aplicativo TREND, onde observou-se diferenças estatísticas significativas nos últimos anos em comparação aos primeiros anos da série histórica, apontando que houve redução, ou seja, piora da condição da vegetação e, portanto, aumento do território a susceptibilidade à desertificação.

Aliado a isso, as interpretações visuais dos índices de vegetação demonstraram que os métodos NDVI, EVI e SAVI se revelaram mais ajustados as condições reais observadas através dos dados usados para os índices físicos de seca e aridez. Apesar de o teste de Tukey ter indicado o método VCI como estatisticamente diferente dos demais tratamentos, e que na ausência desse método pode ser empregado o NDVI, seguido do SVI, do EVI e SAVI sem que haja o comprometimento dos resultados.

No tocante a correlação espacial verificou-se que os índices de aridez (MIA, AI e AI_{ASD}) x índices de vegetação apresentaram melhores resultados quando comparados aos índices de seca (RAI, SPI e PDSI), podendo ser, portanto, empregados para o monitoramento da seca, em conjunto ou não com as ferramentas de sensoriamento remoto.

Já na correlação pontual observou-se que os índices de seca (RAI, SPI e PDSI) apresentaram os menores ajustes de coeficiente de determinação no período analisado (1986-2011) em todos os índices de vegetação estudados (EVI, NDVI, SAVI, EVI e VCI). Ou seja, de modo análogo a correlação espacial, que também não demonstrou boas correlações entre esses métodos. Em contrapartida, os índices de aridez (MIA, AI e AI_{ASD}) apresentaram bons ajustes do coeficiente de determinação com as variáveis dos índices de vegetação.

Esses resultados são importantes, pois demonstram a possibilidade de métodos alternativos para o acompanhamento da seca e da aridez na área de estudo, assim como, da susceptibilidade à desertificação, sobretudo em locais com carência de dados climáticos, como as regiões semiáridas.

Os comportamentos observados na área de estudo mostram apontamentos interessantes, como a necessidade de investimentos em infraestrutura hídrica e de saneamento pelos órgãos gestores, haja vista que o aumento de períodos secos está ocorrendo. Sendo imprescindível, portanto, a implantação de sistemas de gestão, que aumentem a eficiência dos sistemas de distribuição de água, evitem as perdas por evaporação nos açudes, assim como, medidas de educação ambiental para o uso consciente da água, associado a políticas de reuso.

Aliado a isso, a instalação de sistemas de esgotamento sanitário, para o devido tratamento dos efluentes, e minimização da poluição dos corpos d'água, que poderá afetar a disponibilidade em termos de qualidade e quantidade em médio e longo prazo, prejudicando, portanto, não somente as gerações atuais, mas as futuras.

Associado a essas medidas, expandir a rede de monitoramento climático subsidiando o desenvolvimento de pesquisas para investigar a origem do aumento de períodos secos, redução de períodos úmidos, evolução da evapotranspiração, da temperatura, dentre outros fatores que estão relacionados de forma direta aos efeitos das mudanças climáticas, e que podem desencadear o processo de desertificação.

Nesse contexto, a realização de estudos, como o do rio Brígida se fazem relevantes, pois podem servir de modelo para outras áreas com características semelhantes, principalmente porque a ocorrência da redução de períodos úmidos e crescimento de períodos secos, assim como, incremento da susceptibilidade à desertificação não é uma condição isolada em apenas uma dada localidade, bacia hidrográfica ou região, mas sim é uma situação comum em diversas parte do mundo, o que sugere uma relação direta com a mudança do clima, e que, portanto deve ser cuidadosamente investigada e acompanhada.

7 RECOMENDAÇÕES

Diante dos resultados obtidos e as conclusões estabelecidas recomenda-se a utilização de estatística preditiva para a definição de possíveis cenários de seca e de desertificação em escala futura, a exemplo dos recomendados pelo IPCC, assim como, o emprego do aplicativo SisVuClima desenvolvido por Fiocruz (2017) que indica a vulnerabilidade climática da região.

REFERÊNCIAS

- AHMED, K.; SHAHID, S.; WANG, X.; NAWAZ, N.; KHAN, N. Spatio temporal changes in aridity of Pakistan during 1901-2016. **Hydrol. Earth Syst. Science**, v. 23, p. 3081-3096. 2019.
- ALEPE – ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DE PERNAMBUCO. Lei nº 14.090, de 17 de junho de 2010. **Política Estadual de Enfrentamento às Mudanças Climáticas de Pernambuco**. Recife: ALEPE 2010b.
- ALEPE – ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DE PERNAMBUCO. Lei nº 14.091, de 17 de junho de 2010. **Política Estadual de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca**. Recife: ALEPE, 2010a.
- ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V.; CÂNDIDO, G. A. indicadores socioeconômicos e a desertificação no alto curso da bacia hidrográfica do rio Paraíba. **Ambiente & Sociedade**, vol. 20, n. 2, p.19-40, 2017.
- AMORIM, A. C.; CARLO, J. C. Análise das propostas de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro: estudo de caso de Colatina, ES. **Ambiente Construído**, vol. 17, nº 1, p.373-391, 2017.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Diretrizes e análises recomendadas para a consistência de dados pluviométricos**. Brasília: ANA, 2012. 18p.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios – SAR**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/sar/>>. Acesso em: 13 jan 2020.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Sistema de Informações Hidrológicas - HIDROWEB**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em: 01 fev 2017.
- ANTONIO, I. C. Índices climáticos e caracterização climática do entorno de Manaus. **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol. 10, n.4, p.1120-1133, 2017.
- APAC – AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. **Boletim de monitoramento de qualidade das águas dos reservatórios de Pernambuco: nº 3**. Recife: APAC, 2017. 10p.
- AQUINO, D. N.; ROCHA, O. C.; MOREIRA, M. A.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M. Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**, vol. 49, nº 3, 2018.
- ARAÚJO, L. E.; MORAES NETO, J. M.; SOUSA F. A. S. Análise climática da bacia do rio Paraíba – Índice de Anomalia de Chuva (IAC). **Revista de Engenharia Ambiental**, v.6, n.3, p.508-523, 2009.

ARAÚJO, S. M. S. **O Pólo Gesseiro do Araripe: Unidades geoambientais e impactos da mineração**. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 276f. Tese de doutorado (Programa de Pós-graduação em Geociências. Área de Administração e Política de Recursos Minerais), 2004.

AZEVEDO, J. R. G. (Organizador). **Hidrometria aplicada à gestão dos recursos hídricos**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2010. 484p.

AZEVEDO, J. R. G. **Software para Preenchimento de falhas**. Recife: UFPE, 2017.

AZIZ, A.; UMAR, M.; KHAN, M. S.; JAVED, M. N.; GAO, H.; MANSHA M.; FARHAN, S. B.; IQBAL, I.; ABDULLAH, S. Assessment of drought conditions using HJ-1A/1B data: a case study of Potohar region, Pakistan. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, vol. 9, n. 1, p.1019-1036, 2018.

BAJGAIN, R.; XIAO, X.; WAGLE, P.; BASARA, J.; ZHOU, Y. Sensitivity analysis of vegetation indices to drought over two tallgrass prairie sites. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 108, p. 151–160, 2015.

BANNARI, A.; MORIN, D.; BONN, F. A review of vegetation índices. **Remote Sensing Reviews**, vol. 13, p.95-120, 1995.

BARATTO, J.; BORGES, D. C.; HOPPE, I. L.; WOLLMANN, C. A. Análise histórica da precipitação pluviométrica em Passo Fundo e Cruz Alta – municípios da bacia hidrográfica do Alto Jacuí/RS. **Anais. XII SBCG**, Goiânia – GO, UFG, 2016, 1829-1840p.

BARBOSA JR., A. R. **Elementos de Hidrologia Aplicada**. Ouro Preto-MG: UFOP, 2015.

BARBOSA, H. A.; KUMAR, T. L.; PAREDES, F.; ELLIOTT, S.; AYUGAE, J. G. Assessment of Caatinga response to drought using Meteosat-SEVIRI Normalized Difference Vegetation Index (2008–2016). **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 2019. 18p.

BERHAN, G.; HILL, S.; TADESSE, T.; ATNAFU, S. Using satellite images for drought monitoring: a knowledge discovery approach. **J Strategic Innov Sustain.**, vol. 7, nº 1, 2011.

BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Avaliação e adaptação do índice de severidade de seca de Palmer (PDSI) e do índice padronizado de precipitação (SPI) às condições climáticas do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, vol.64, n.4, p.695-705, 2005.

BLAIN, G. C.; KAYANO, M. T. 118 anos de dados mensais do índice padronizado de precipitação: série meteorológica de campinas, estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol.26, n.1, p.137-148, 2011.

BRAGA, A. C. F. M.; PONTES FILHO, J. D. A.; BRAGA, C. F. C. SPI como ferramenta para a gestão dos recursos hídricos: estudo de caso da bacia do rio Piranhas-Açu. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XXI, 2015, Brasília, DF. **Anais**. Brasília: ABRH, 2015.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. **Banco de dados e registros de desastres: sistema integrado de informações sobre desastres – S2ID**. 2020. Disponível em: <<http://s2id.integracao.gov.br/>>. Acesso em: 14 jan 2020.

BURITI, C. O.; BARBOSA, H. A. **Um século de secas: por que as políticas hídricas não transformam o semiárido brasileiro**. Portugal: Editora Chiado, 2018. 434p.

CÂNDIDO, D. H.; NUNES, L. H. Influência da orografia na precipitação da área entre o vale do rio Tietê e a Serra da Mantiqueira. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, v. 1, n. 24, p. 08-27. 2008.

CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; MARTINS, S. V.; SOARES, C. P. B. Caracterização hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, vol.30, n° 2, p.249-256, 2006.

CARDOSO, L. S.; BERGAMASCHI, H.; BOSCO, L. C.; PAULA, V. A.; MARODIN, G. A. B.; CASAMALI, B.; NACHTIGALL, G. R. Disponibilidades climáticas para macieira na região de Vacaria, RS. **Revista Ciência Rural**, vol.42, n°11, p.1960-1967, 2012.

CASTRO, A. L. C. **Manual de desastres: desastres naturais**. Brasília – DF: Ministério da Integração Nacional, 2003. 182p.

CENAD – CENTRO NACIONAL DE GERENCIAMENTO DE RISCOS E DESASTRES. **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2011**. Brasília: CENAD, 2012. 80p.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS – CPTEC. **Condições da Última Semana: condições de neutralidade no pacífico equatorial**. Brasília: CPTEC, 2017. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/#>>. Acesso em: 12 nov 2017.

CEPED UFSC - CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM ENGENHARIA E DEFESA CIVIL. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012 - Volume Pernambuco**. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. 74p.

CEPED UFSC - Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. **1583 / 2012: Histórico de secas no Nordeste do Brasil**. Santa Catarina, SC: CEPED UFSC, 2015. Disponível em: <http://www.ceped.ufsc.br/historico-de-secas-no-nordeste-do-brasil/>. Acesso em: 10 nov. 2017.

CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil**. Brasília, DF: CGEE, 2016. 252p.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, vol. 113, n. 5, p.893-903, 2009.

CHEVAL, S.; DUMITRESCU, A.; BIRSAN, M.-V. Variability of the aridity in the South-Eastern Europe over 1961-2050. **Catena**, vol. 151, n. 74, p.74-86, 2017.

CHIEW, F.; SIRIWARDENA, L.; ARENE, S.; RAHMAN, J. **TREND detection software**. Australia: CRC for Catchment Hydrology's (CRCCH) Climate Variability Program, 2017. Disponível em: <www.toolkit.net.au/trend>. Acesso em 10 jan 2017.

CHOWDHURY, A. I. Assessment of intensity and distribution of aridity over Bangladesh using different climate indices with GIS. **Climate Change**, v. 4, n. 16, p. 743-749. 2018.

CIRILO, J. A.; NETTO, M. S. C. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ASFORA, M. C. **Caracterização do semiárido brasileiro**. In: Cirilo *et al.* (Org.). O uso sustentável dos recursos hídricos em regiões semiáridas. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2007. 508p.

CLEMENTE, C. M. S.; PEREIRA, D. M.; LEAL, T. L. M. C.; REIS, M. F. T. Análise espacial da precipitação pluviométrica na microbacia do Rio Carnaíba de Dentro e seu entorno no semiárido baiano entre 2009 a 2014. **Caderno de Geografia**, vol.27, n° 49, p.353-367, 2017.

CONDEPE/FIDEM. **Anuário Estatístico de Pernambuco - 2015**. Recife: CONDEPE/FIDEM, 2016. Disponível em: < <http://www.anuario.pe.gov.br/>>. Acesso em: 17 nov 2017.

CONDEPE/FIDEM. **Pernambuco: realidade e desafios**. Recife: CONDEPE/FIDEM, 2009.

CONDEPE/SUDENE - Instituto de Desenvolvimento de Pernambuco; Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária; Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste. **Zoneamento Pedoclimático do Estado de Pernambuco**. Recife, PE: CONDEPE / SUDENE, 1987.

CONTI, J. B. A questão climática do Nordeste brasileiro e os processos de desertificação. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p. 7-14. 2005.

CORDEIRO, A. P. A.; BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C.; MELO, R. W.; SHIMABUKURO, Y. E.; FIOR, C. S. Regiões homogêneas de vegetação utilizando a variabilidade do NDVI. **Ciência Florestal**, vol. 27, n° 3, p.883-896, 2017.

COSTA, B. R. S.; OLDONI, H.; SILVA, T. M. M.; BASSOI, L. H. Desempenho de métodos para estimativa do índice de vegetação por diferença normalizada em videiras mediante sensoriamento proximal. **SIAGRO**, p.58-62, 2019.

COSTA, J. A.; RODRIGUES, G. P. Space-time distribution of rainfall anomaly index (RAI) for the Salgado Basin, Ceará State – Brazil. **Revista Ciência e Natura**, v. 39, n. 3, p. 627-634. 2017.

COVELE, P. A. Aplicação de índices das condições de vegetação no monitoramento em tempo quase real da seca em Moçambique usando NOAA_AVHRR- NDVI. **GEOUSP - Espaço e Tempo**, nº 29, p. 85-95, 2011.

CPRH – AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. **Relatório de monitoramento da qualidade da água de bacias hidrográficas do estado de Pernambuco em 2017**. Recife: CPRH, 2017.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Polo Gesseiro do Araripe discute o desenvolvimento do setor**. Brasília: CPRM, 2017b. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br/publique/Noticias/Polo-Gesseiro-do-Araripe-discute-o-desenvolvimento-do-setor-4664.html>>. Acesso em: 28 fev 2020.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa de Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil**. Brasília: CPRM, 2014.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS**. Brasília: CPRM, 2017a. Disponível em: < <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>. Acesso em: 09 nov 2017.

CPTEC - CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Condições da Última Semana: condições de neutralidade no pacífico equatorial**. Brasília, DF: CPTEC, 2017. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/#>. Acesso em: 12 nov. 2017.

DABAGHI, M.; MANJARI, K. G. A. The Climate Survey of Razan-Qahavand Plain Through de-Martonne Aridity Index. **The International Journal of Engineering and Science**, v. 6, n. 9, p. 49-60. 2017.

DANIEL MARUSIG; FRANCESCO PETRUZZELLIS; MARTINA TOMASELLA; ROSSELLA NAPOLITANO; ALFREDO ALTOBELLI; ANDREA NARDINI. Correlation of Field-Measured and Remotely Sensed Plant Water Status as a Tool to Monitor the Risk of Drought-Induced Forest Decline. **Forests**, vol. 11, n. 77, 2020. 13p.

DANTAS, J. R. A.; LIMA FILHO, C. A. **Síntese da geologia de Pernambuco**. Recife: DNPM, 2006. Disponível em: < http://www.dnpm-pe.gov.br/Sint_PE/Indice.php>. Acesso em: 09 nov 2017.

DANTAS, M. E.; FERREIRA, R. V.; SHINZATO, E.; BRANDÃO, R. L.; TEIXEIRA, W. G.; FREITAS, L. C. A geodiversidade da Chapada do Araripe: de Padre Cícero a Luiz Gonzaga. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 12º, 2018, Crato, CE. **Anais**. Ceará: CPRM, 2018.

DANTAS, R. A. **Engenharia de Avaliações: uma Introdução à Metodologia Científica**. São Paulo: Editora Pini, 2012. 255p.

DAS, R.; DAS, P. K.; BANDYOPADHYAY, S.; RAJ, U. Trends and vulnerability assessment of meteorological and agricultural drought conditions over Indian region using time-series (1982-2015) satellite data. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII, p.453-459, 2019.

DICIO. **Dicionário Online de Português**. Porto: 7 Graus, 2019. Disponível em: <<https://www.dicio.com.br/>>. Acesso em: 23 fev 2020.

DIKBAS, F.; BACANLI, U. G. Detecting Drought Variability by using Two-Dimensional Correlation Analysis. **Teknik Dergi**, 2020. 19p.

DIKICI, M.; AKSEL, M. Evaluation of Two Vegetation Indices (NDVI and VCI) Over Asi Basin in Turkey. **Teknik Dergi**, 2020. 17p.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Mineração no semiárido brasileiro**. Brasília - DF: Ministério das Minas e Energia, 2009. 200p.

DOWNING, D.; CLARK, J. **Estatística Aplicada**. São Paulo: Saraiva, 2010.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. New York: John Wiley and Sons, 1980. p.398-402.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Árvore do conhecimento: Solos Tropicais**. Brasília: EMBRAPA, 2010. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/Abertura.html>. Acesso em: 09 nov 2017.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Árvore do conhecimento: bioma Caatinga**. Brasília: EMBRAPA, 2012. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_caatinga/Abertura.html>. Acesso em: 29 nov 2017.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Clima**. Brasília: EMBRAPA, 2016. Disponível em: <<https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm>>. Acesso em: 01 fev. 2017

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Satélites de Monitoramento**. São Paulo: EMBRAPA – Monitoramento por Satélite, 2013. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_landsat.html>. Acesso em: 16 jan. 2017.

ESHETU, G.; JOHANSSON, T.; GAREDEW, W. Rainfall trend and variability analysis in Setema-Gatira area of Jimma, Southwestern Ethiopia. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 32, p. 3037-3045. 2016.

ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **How IDW Works**. USA: ESRI, 2016. Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-idw-works.htm>>. Acesso em: 01 nov 2017.

- FAEIRSTEIN, G. V. M. **Avaliação do índice de severidade de seca de Palmer (PDSI) através de planilha eletrônica**. 2019. 94f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.
- FALZOI, S.; GLEESON, E.; LAMBKIN, K.; ZIMMERMANN, J.; MARWAHA, R.; O'HARA, R.; GREEN, S.; FRATIANNI, S. Analysis of the severe drought in Ireland in 2018. **Weather**, vol. 74, n. 11, p.368-373, 2019.
- FARIAS, A. A.; SOUSA, F. A. S.; MORAES NETO, J. M.; ALVES, A. S. Secas e seus impactos no município de Boqueirão, PB, Brasil. **Revista Ambiente e Água**, vol. 12, n. 2, p.316-330, 2017.
- FARO, G. T. C.; GARCIA, J. I. B.; OLIVEIRA, C. P. M.; RAMOS, M. R. S. Application of indices for water resource systems stress assessment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, e7, p. 1-13. 2019.
- FECHINE, J. A. L.; GALVÍNCIO, J. D. Uma Forma de Convivência Com a Seca: Bacia Hidrográfica do Rio Brígida - Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 4, p. 724-730. 2014.
- FELIX, V. S. Análise de 40 Anos de Precipitação Pluviométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Espinharas – PB. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 08, n. 05, p.1347-1358. 2015.
- FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; DA PAZ, R. L.; AMORIM, A. O.; CARDOSO, A. S. **Índices para a Quantificação da Seca**. Goiás: EMBRAPA Arroz e Feijão, 2009. 48p.
- FERREIRA, T. R.; DI PACE, F. T.; SILVA, B. B.; DELGADO, J. R. Recognition of sensitive areas to desertification process in three states through vegetation índices. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, vol. 37, n. 6, 2017.
- FERRELLI, F.; BUSTOS, M. L.; PICCOLO, M. C. Variabilidad climática temporal y sus efectos: aportes al ordenamiento territorial de la costa norte del estuario de Bahía Blanca (Argentina). **Revista Universitaria de Geografía**, vol. 26, n.1, p.79-96, 2017.
- FIOCRUZ - FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ. **Vulnerabilidade a mudança do clima**. Recife, PE: FIOCRUZ, 2017. Disponível em: <https://projetovulnerabilidade.fiocruz.br/noticias/103-seminario-23>. Acesso em: 06 jan. 2020.
- FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 128p.

FREIRES, E. V.; SILVA NETO, C. A.; CUNHA, D. S. R.; DUARTE, C. R.; VERÍSSIMO, C. U. V.; GOMES, D. D. M. Comparação de Imagens OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2 no Mapeamento de Cobertura e Uso da Terra no Maciço de Uruburetama, Ceará. **Anuário do Instituto de Geociências**, vol. 42, n. 4, p. 427-442, 2019.

FREITAS, M. A. S. Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semiáridas. **Revista Tecnologia**, p.84-95, 2005.

GANEM, R. S. **Caatinga: estratégias de conservação - Consultoria Legislativa**. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 2017. 105p. Disponível em: <http://bd.camara.gov.br/bd/handle/bdcamara/34479>. Acesso em: 01 jan. 2020.

GAO, Y.; LI, X.; LEUNG, L. R.; CHEN, D.; XU, J. Aridity changes in the Tibetan Plateau in a warming climate. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 034013. 2015.

GOMES, H. B.; CAVALCANTE, L. B.; SILVA JUNIOR, R. S.; SANTOS, M. N. Temperatura da superfície e albedo na região de Ilha Solteira, São Paulo. **Mercator**, vol. 16, p.1-16, 2017.

GOTELLI, N. J.; ELLISON, A. M. **Princípios de estatística em ecologia**. Porto Alegre: ARTMED, 2011. 510p.

GOUVEIA, C. M.; TRIGO, R. M.; BEGUERÍA, S.; VICENTE-SERRANO, S. M. Drought impacts on vegetation activity in the Mediterranean region: an assessment using remote sensing data and a multi-scale drought indicators. **Global and Planetary Change**, vol. 151, p.15-27, 2017.

GRANJA, C. V. A.; CAVALCANTE, E. P.; CAFFÉ FILHO, H. P.; SIQUEIRA, M. S.; NASCIMENTO, W. Degradação Ambiental: Exploração de Gipsita no Polo Gesseiro do Araripe. **Revista Multidisciplinar e de Psicologia**, v.11, n. 36, p. 239-267. 2017.

GROSS, J. A.; CASSOL, R. Ocorrências de índices de anomalia de chuva negativos no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Geografia Acadêmica**, v. 9, n. 2, p. 21-33. 2015.

GUENANG, G. M.; KAMGA, F. M. Computation of the Standardized Precipitation Index (SPI) and its use to assess drought occurrences in Cameroon over recent decades. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 53, p. 2310-2324. 2014.

GURGEL, H. C.; FERREIRA, N. J.; LUIZ, A. J. B. Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil, utilizando-se a análise de agrupamentos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.1, p.85-90, 2003.

HAIR JR., J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. **Multivariate Data Analysis**. USA: Pearson, 2014. 739p.

HARGREAVES, G. H; CHRISTIANSEN, J. E. Production as a function of moisture availability. **ITCC Review III**, vol. 9, p. 179-189, 1974.

HOPKINS, W. G. **Correlation coefficient: a new view of statistics**. USA: Sportscience, 2002. Disponível em: <<https://www.sportsci.org/resource/stats/effectmag.html>>. Acesso em: 12 dez. 2017.

HUETE, A. R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote sensing of environment**, n° 25, p.295-309, 1988.

HUETE, A. R.; JACKSON, R. D.; POST, D. F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. **Remote sensing of environment**, n° 17, p.37-53, 1985.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing Environment**, n° 59, p.440-451, 1997.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico de 2010**. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 07 nov 2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistematização das Informações sobre Recursos Naturais - Vegetação, Relevo, Solos e Geologia - escala 1:250.000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 04 nov 2017.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)**. Brasília: INMET, 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em 04 dez 2017.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas do Brasil: 1961-1990**. Brasília: INMET, 2009. 465p.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Divisão de geração de imagens: os satélites LANDSAT 5 e 7**. Brasília: INPE, 2017. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57_PT.php>. Acesso em: 16 jan. 2020.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Chapter 3: Desertification**. Switzerland, SWI: IPCC, 2019. 174p.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability - Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. New York, USA: IPCC, 2014. 688p.

JAVED, T.; YAO, N.; CHEN, X.; SUON, S.; LI, Y. Drought evolution indicated by meteorological and remote-sensing drought indices under different land cover types in China. **Environmental Science and Pollution Research**, 2019. 17p.

JESUS, J. B.; SOUZA, B. B.; OLIVEIRA, A. M. S.; GAMA, D. C. Aridity index and climatic risk of desertification in the semi-arid state of Sergipe. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 15, v. 24, p. 214-227. 2019.

JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, D. P.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V. V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R. B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; WAN, Z.; HUETE, A. R.; LEEUWEN, W. V.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J. P.; LEWIS, P.; BARNSLEY, M. J. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 36, n° 4, p.1228-1249, 1998.

KOGAN, F. N. A typical pattern of vegetation conditions in southern Africa during El Nino years detected from AVHRR data using three-channel numerical index. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 19, n. 18, p.3688-3694, 1998.

KOUDAHE, K.; KAYODE, A. J.; SAMSON, A. O.; ADEBOLA, A. A.; DJAMAN, K. Trend Analysis in Standardized Precipitation Index and Standardized Anomaly Index in the Context of Climate Change in Southern Togo. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 7, p. 401-423. 2017.

LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; VICTÓRIA, D. C.; BARROS, T. R.; TORRESAN, F. E.; BOLFE, É. L. Padronização do índice de vegetação do Pantanal a partir de imagens do SPOT Vegetation. **Anais**. 4º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Bonito, MS, Brasil, 2012, p.798-805.

LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; VICTORIA, D. C.; TORRESAN, F. E.; BOLFE, E. L. Monitoramento da seca 2011/2012 no nordeste brasileiro a partir do satélite SPOT-Vegetation e TRMM. **Engenharia na agricultura**, vol.22, n.3, p.211-221, 2014.

LIANG, L.; SUN, Q.; LUO, X.; WANG, J.; ZHANG, L.; DENG, M.; DI, L.; LIU, Z. Long-term spatial and temporal variations of vegetation drought based on vegetation condition index in China. **Ecosphere Journal**, vol. 8, n. 8, p.1-15, 2017.

LIAQAT, M. U.; CHEEMA, M. J. M.; HUANG, W.; MAHMOOD, T.; ZAMAN, M.; KHAN, M. M. Evaluation of MODIS and Landsat multiband vegetation indices used for wheat yield estimation in irrigated Indus Basin. **Computers and Electronics in Agriculture**, vol. 138, p.39-47, 2017.

LIMEIRA, R. C.; AZEVEDO, P. V.; BEZERRA, W. A.; ALMEIDA, M. V. Índice de severidade de seca de Palmer para localidades representativas das microrregiões do litoral e sertão do estado da Paraíba. **Anais**. XIV CBMET, Florianópolis, SC, Brasil, 2006, 6p.

LINS, F. A. C.; SILVA, J. L. B.; MOURA, G. B. A.; ORTIZ, P. F. S.; OLIVEIRA, J. D. A.; ALVES, M. V. C. Quantile technique to precipitation, rainfall anomaly index and biophysical parameters by remote sensing in Serra Talhada, Pernambuco. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 7, n. 6, p. 334-344. 2017.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Oficina de Textos, 2015. 908p.

LIU, W. T.; KOGAN, F. N. Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 17, n° 14, p.2761-2782, 1996.

LIVADA, I.; ASSIMAKOPOULOS, V. D. Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI). **Theoretical Applied Climatology**, vol. 89, p.143-153, 2007.

LOPES, I.; LEAL, B. G. Índice de aridez e tendência a desertificação para estações meteorológicas nos estados da Bahia e Pernambuco. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 11, v. 17, p. 155-172. 2015.

LOURENÇO, V. R.; RAMOS, N. N. L. A.; COSTA, C. A. G. Distribuição espaço-temporal do NDVI sob condições de Caatinga preservada. **Espaço Aberto**, vol. 6, n.2, p.101-110, 2017.

LUCENA, R. L.; CABRAL JÚNIOR, J. B.; STEINKE, E. T. Comportamento Hidroclimatológico do Estado do Rio Grande do Norte do Município de Caicó. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p. 485-496. 2018.

MAINGUET, M. **Aridity: droughts and human development**. New York: Springer, 1998.

MALIVA, R.; MISSIMER, T. **Arid lands water evaluation and management**. Berlim: Environmental Science and Engineering, 2012.

MARENGO, J. A. **Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semiárido do Brasil**. Brasília, DF: Parcerias estratégicas, n. 27, p. 149-176. 2008.

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

MARTONNE, E. Aréisme et Indice d'aridité. **Comptes Rendus de L'Academy des Sciences**, Paris, vol.182, p.1395-1398, 1926.

MASSELINK, L.; BAARTMAN, J.; VERBESSELT, J.; BORCHARDT, P. Using remotely sensed vegetation indices to model ecological pasture conditions in Kara-Unkur watershed, Kyrgyzstan. **Geophysical Research**, vol. 19, 2017.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, JOHN. **The relationship of drought frequency and duration to time scales**. Eighth Conference on Applied Climatology, p.17-22, 1993, Anaheim – California.

MEDEIROS, S. S.; CECÍLIO, R. A.; MELO JÚNIOR, J. C. F.; SILVA JUNIOR, J. L. C. Estimativa e espacialização das temperaturas do ar mínimas, médias e máximas na Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol.9, nº 2, p.247-255, 2005.

MENDES, P. P. **Estatística aplicada a aquicultura**. Recife: Editora Bagaço, 1999. 265p.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. CNPq / UnB: Brasília, 2012. 266p.

MENESES, P. R.; NETTO, J. S. M. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília. UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001.

MIN – MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Atualiza os critérios que delimitam a região semiárida do Nordeste. **Portaria Interministerial nº 01** do Ministério da Integração Nacional publicada no dia 09 de março de 2005, 2005b.

MIN – MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Nova delimitação do semiárido brasileiro: Portaria nº 89 de 16 de março de 2005**. Brasília: MIN, 2005a. 35p.

MIRANDA, C. S.; GAMARRA, R. M.; MIOTO, C. L.; SILVA, N.M.; CONCEIÇÃO FILHO, A. P.; POTT, A. Analysis of the landscape complexity and heterogeneity of the Pantanal wetland. **Brazilian Journal of Biology**, p.1-10, 2017.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil**. Brasília, DF: MMA, 2007. 134p.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca – Pan-Brasil**. Brasília: MMA, 2005. 242p.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resoluções do CONAMA: 1984 - 2012**. Brasília, DF: MMA, 2012. 1126p.

MORAES, B. C.; COSTA, J. M. N.; COSTA, A. C. L.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Revista Acta Amazônica**, vol. 35, nº 2, 2005, p.207-214.

MORAL, F. J.; PANIAGUA, L. L.; REBOLLO, F. J.; GARCÍA-MARTÍN, A. Spatial analysis of the annual and seasonal aridity trends in Extremadura, southwestern Spain. **Theor Appl Climatol**, v. 130, p. 917-932. 2017.

MOREIRA, A. A.; GUASSELLI, L. A.; SILVA FILHO, L. C. P.; ANDRADE, A. C. F.; ARRUDA, D. C. Índice de Condição da Vegetação (VCI) para mapeamento de seca no Norte do Estado de Minas Gerais. **Anais. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, INPE, 2015, 1686-1692p.

MUHIRE, I.; AHMED, F. Spatiotemporal trends in mean temperatures and aridity index over Rwanda. **Theor Appl Climatol**, v. 123, p. 399-414. 2016.

MÜLLER, A. L.; DALMAGO, G. A.; FERNANDES, J. M. C.; CUNHA, G. R.; SANTI, A.; KOVALESKI, S.; BOLIS, L. M.; SCHWEIG, E.; FOCHESSATTO, E. Crescimento e acúmulo de biomassa em floresta ombrófila mista no Sul do Brasil. **Revista Árvore**, vol.38, nº 2, p.221-231, 2014.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2010. 387p.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; SOUSA, G.; NUNES, M.; FERNANDES, M.; TOMZHINSKI, G. Relação entre o Standardized Precipitation Index (SPI) e os Relatórios de Ocorrência de Incêndios (ROI) no Parque Nacional do Itatiaia. **Floresta e Ambiente**, vol. 24, p.1-9, 2017.

OLIVEIRA, F. N. M.; ARAÚJO, R. L. C.; CARVALHO, J. S.; SILVA, C. L. Inferência de mudanças climáticas na região de Manaus (AM) usando dados geotermiais e meteorológicos. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol. 24, nº 2, p.169-187, 2006.

OLIVEIRA, G. S. **O El Niño e você: o fenômeno climático**. São Paulo: Transtec, 2001. 116p.

OLIVEIRA, M. R. P.; GALVANI, E. Avaliação do efeito orográfico na variação das precipitações no perfil longitudinal Paraty (RJ) e Campos do Jordão (SP). **Entre-Lugar**, ano 6, n.11, vol. 1, p.133-151, 2015.

ONU – UNITED ORGANIZATION NATIONS. **Global drylands: a UN system-wide response**. USA: ONU, 2011. 132p.

PALMER, W. C. Meteorological drought. **Research Paper**, nº 45, p.1-65, 1965.

PERUZZO, J. S.; PEREIRA, M. C. S.; SILVA, L. D. R.; OLIVEIRA, B. S.; SILVINO, G. S. Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento ambiental da bacia do Alto Piranhas, Semiárido Nordeste (Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, vol.7, n.3. p.028-037, 2019.

PETERS, A. J.; WALTER-SHEA, E. A.; JI, L.; VIÑA, A.; HAYES, M.; SVOBODA, M. D. Drought monitoring with NDVI-Based Standardized Vegetation Index. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. 68, nº 1, p. 71-75, 2002.

PIMENTEL, E. F. **A riqueza do bioma caatinga**. São Paulo: GGN – O Jornal de Todos os Brasis, 2011.

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Blucher, 1976. 278p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 160p.

PRAMUDYA, Y.; ONISHI, T.; SENGE, M.; HIRAMATSU, K.; PRASETYO, M. R. N. Evaluation of recent drought conditions by standardized precipitation index and potential evapotranspiration over Indonesia. **Paddy and Water Environment**, v. 17, p. 331-338. 2019.

RAMOS, A. M.; VIANELLO, R. L.; SANTOS, L. A. R.; FORTES, L. T. G.; CONDE, F. C.; BARBOSA, T. F.; MONTANDON, A. C.; FERREIRA, D. B.; SALVADOR, M. A.; SILVA, F. D. S.; MELLO, L. T. A.; ANUNCIAÇÃO, Y. M. T.; BALBINO, H. T. Revisão das Normais Climatológicas do Brasil para o período 1961-1990: Fundamentos e Aplicações. **Anais**. XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET), Belém-PA, SBMET, 2010. 5p.

REINERMANN, S.; URSULA G.; ASAM, S.; KUENZER, C.; DECH, S. The Effect of Droughts on Vegetation Condition in Germany: An Analysis Based on Two Decades of Satellite Earth Observation Time Series and Crop Yield Statistics. **Remote Sensing**, vol. 11, n. 1783, p. 1-21, 2019.

RENCHE, A. C. **Methods of multivariate analysis**. USA: A Wiley-Interscience publication, 2002. 727p.

RIBEIRO, S. K.; SANTOS, A. S. (Eds.). **Mudanças Climáticas e Cidades: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Rio de Janeiro, RJ: PBMC, COPPE – UFRJ, 2016. 116p.

RODRIGUES, D. F. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; VILLAR, A. C.; GUSMÃO, L.; ARAÚJO, D. C. S.; URSULINO, B. S. Caracterização do Índice de Severidade da Seca de Palmer na Bacia do Rio Pajeú – PE Utilizando Computação em Nuvem. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, XIV, 2018, Maceió, AL. **Anais**. Maceió: ABRH, 2018.

ROOY, M. P. V. A rainfall anomaly index independent of time and space. **Notos**, vol. 14, p.43-48, 1965.

ROSSATO, L.; MARENGO, J. A.; ANGELIS, C. F.; PIRES, L. B. M.; MENDIONDO, E. M. Impact of soil moisture over Palmer Drought Severity Index and its future projections in Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, e.36. 2017.

ROTJANAKUSOL, T.; LAOSUWAN, T. Drought evaluation with NDVI-based standardized vegetation index in lower Northeastern region of Thailand. **Geographia Technica**, vol. 14, n. 1, p. 118-130, 2019.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. In: **Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium**, nº 3, vol. 1, Paper A 20, p.309-317, 1973.

SÁ, I. I. S.; R-TOURA, M. S. B.; BARBOSA, L. F. S.; SILVAS, T. G. F.; GALVÍNCIO, J. D. **Influência dos cenários de mudanças climáticas na evapotranspiração potencial da bacia hidrográfica do Sub-médio São Francisco**. In: GALVÍNCIO, J. D. *Mudanças climáticas e impactos ambientais*. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2010. cap. 7, p. 133-144.

SALIMON, C.; ANDERSON, L. How Strong is the relationship between rainfall variability and Caatinga productivity? A case study under a changing climate. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, p.1-7, 2017.

SAMPAIO, J. C. L.; PINTO, É. J. A. Análise da estiagem de um dos principais reservatórios da região metropolitana de Belo Horizonte. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, XIV, 2018, Maceió, AL. **Anais**. Maceió: ABRH, 2018.

SANTOS, F. A.; MENDES, L. M. S.; CRUZ, M. L. B. Análise do índice de aridez da bacia hidrográfica do rio Piracuruca - Ceará-Piauí, Nordeste do Brasil. **Revista Geosul**, v. 33, n. 67, p. 181-199. 2018.

SANTOS, S. R. Q.; BRAGA, C. C.; SANSIGOLO, C. A.; SANTOS, A. P. P. Determinação de Regiões Homogêneas do Índice de Precipitação Normalizada (SPI) na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 32, n. 1, p.111-122, 2017.

SAUSEN, T.M.; LACRUZ, M. S. P. **Sensoriamento remoto para desastres**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 285p.

SEARCY, J. K.; HARDISON, C. H. **Manual of Hidrology: Part 1, General Surface Water Techniques: Double-Mass Curves**. USA: United States Geological Survey (USGS), 1960. 41p.

SECTMA – SECRETARIA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE. **Atlas de Bacias Hidrográficas de Pernambuco**. Recife, PE: SECTMA, 2006.

SECTMA – SECRETARIA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE. **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco – PERH-PE**. Recife, PE: SECTMA, 1998.

SEMAS – SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE. **Plano Estadual de Mudanças Climáticas**. Recife: SEMAS, 2011. 94p.

SILVA, D. G. **Evolução paleoambiental dos depósitos de tanques em Fazenda Nova, município de Brejo da Madre de Deus – Pernambuco**. Dissertação do Programa de Pós-graduação em Geografia, UFPE, 2007. 155p.

SILVA, I. P.; SILVA, J. A. A. **Métodos estatísticos aplicados à pesquisa científica: uma abordagem para profissionais da pesquisa agropecuária**. Recife: UFRPE, 2003. 305p.

SILVA, J. L. B.; MOURA, G. B. A.; SILVA, Ê. F. F.; LOPES, P. M. O.; SILVA, T. T. F.; LINS, F. A. C.; SILVA, D. A. O.; ORTIZ, P. F. S. Spatial-temporal dynamics of the Caatinga vegetation cover by remote sensing in municipality of the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, vol.14, n.4, 2019. 10p.

SILVA, R. O. B. **Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica do Estado de Pernambuco**. Recife: UFPE, 2013. 97 p.

SILVEIRA, S. C. R.; TEIXEIRA-GANDRA, C. F. A.; DAMÉ, R. C. F.; LEMOS, G. S.; WEYMAR JUNIOR, L. C. N.; KARSBURG, R. M.; TAVARES, M. A. R.; CADONÁ, E. A.; COUTO, R. S.; NUNES, G. S.; KLUMB, G. B.; MORAES, P. Índice de Severidade de Seca de Palmer Utilizando Metodologias Indiretas para a Estimativa da Evapotranspiração de Referência para Pelotas/RS. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XXII, 2017, Florianópolis, SC. **Anais**. Florianópolis: ABRH, 2017.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical Methods**. USA: The Iowa State University Press, 1968.

SOUSA JÚNIOR, M. A.; SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. Monitoramento de estiagem na região Sul do Brasil utilizando dados ENVI/MODIS no período de dezembro de 2000 a junho de 2009. **Anais**. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 2011, p.5901-5908.

SOUTO, J. I. O.; BELTRÃO, N. E. S.; OLIVEIRA, R. M. S. Avaliação de secas meteorológicas por detecção remota no arquipélago do Marajó: uma interpretação espacial dos dados da CPC MORPHING TECHNIQUE. **Bol.Goia. Geogr.**, vol. 39, 2019. 25p.

SOUZA, I. F.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, V. P. R.; QUEIROZ, M. G. Tendência climática do Índice de aridez do estado de Pernambuco, Brasil. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, XVI, 2010, Belém, PA. **Anais**. Belém: SBMET, 2010.

SRHE – SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E ENERGÉTICOS. **Ficha técnica dos reservatórios por bacia hidrográfica**. Recife: SRHE. Disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br/monitoramento/>>. Acesso em: 28 nov 2017.

THOM, H. C. S. Some methods of climatological analysis. **WMO Technical Note**, n° 81, 1966. 53p.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, vol. 38, n° 1, p. 55-94, 1948.

TOPODATA. **Banco de dados geomorfométricos do Brasil**. São Paulo: INPE, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 09 nov 2017.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 2013. 943 p.

UFSC – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Capacitação básica em Defesa Civil**. Florianópolis: CAD UFSC, 2012. 122 p.

UNCCD - UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION. **Desertification: the invisible frontline**. Geneva: UNCCD, 2014. 20p.

UNESCO - UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. Map of the world distribution of arid regions: explanatory note. **MAB Technical Notes**, n° 7, p.1-53, 1979.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: Editora Mc Graw Hill, 1975. 245p.

WATERS, R.; ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; BASTIAANSSEN, W. **Surface Energy Balance Algorithms for Land: advance training and users manual**. Idaho: NASA, 2002. 98p.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Calculation of monthly and annual 30-year standard normals. **WMO Technical Document**, n° 341, WCPD n° 10, 1989. 13p.

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Drought Assessment and Forecasting. **WMO Working Group on Hydrology (WGH)**, n° 6, 2005. 88p.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Expert Workshop on Trend/Change Detection and the CRC for Catchment Hydrology publication Hydrological Recipes. WMO, 1996.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to climatological practices**. Geneva: WMO, 2011. 117 p.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Standardized Precipitation Index: User Guide. **WMO Technical Document**, n° 1090, 2012. 24p.

GLOSSÁRIO

RESILIÊNCIA	Tendência natural para se recuperar ou superar com facilidade os problemas que aparecem.
SUSCEPTIBILIDADE	Ação, particularidade ou condição de susceptível. Sensibilidade.
VULNERABILIDADE	Que pode ser ferido por; destruído: construção vulnerável às alterações climáticas.

Fonte: DICIO (2019).

APÊNDICE A – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS VALORES DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO (NDVI, EVI, SAVI, SVI E VCI) NA BACIA DO RIO BRÍGIDA.

Tabela A.1 – Estatística descritiva dos valores de NDVI.

Data das Imagens	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
28/11/1986	-0,483345	0,843848	0,441621	0,138828
23/05/1987	-0,364878	0,813273	0,552052	0,107063
24/06/1987	-0,387275	0,788971	0,444011	0,118848
16/06/1990	-0,425117	0,834773	0,515063	0,117463
17/12/1993	-0,269365	0,857852	0,321513	0,095311
02/11/1994	-0,417781	0,778955	0,285587	0,077711
15/05/1996	-0,281119	0,859599	0,644205	0,110355
26/09/1998	-0,237104	0,698230	0,290298	0,058316
28/10/1998	-0,288089	0,767563	0,280095	0,056341
04/10/2001	-0,275411	0,824847	0,310816	0,076427
06/07/2003	-0,494594	0,831029	0,302032	0,111491
12/10/2004	-0,530705	0,770656	0,234104	0,100299
15/10/2005	-1,032637	0,767506	0,207730	0,082022
30/07/2006	-0,520246	0,808347	0,352730	0,144355
22/01/2007	-0,531951	0,761555	0,287837	0,116245
21/09/2008	-0,467992	0,774301	0,265583	0,108404
24/09/2009	-0,412612	0,767745	0,286382	0,113798
27/11/2009	-0,419688	0,749965	0,307823	0,116288
29/08/2011	-0,424531	0,769872	0,287671	0,127415

Fonte: A Autora (2020).

Tabela A.2 – Estatística descritiva dos valores de EVI.

Data das Imagens	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
28/11/1986	-0,203893	1,115382	0,317389	0,118348
23/05/1987	-0,172291	0,878602	0,399903	0,106048
24/06/1987	-0,173675	0,803343	0,292772	0,100430
16/06/1990	-0,212325	0,908806	0,343536	0,105352
17/12/1993	-0,074756	0,703056	0,212740	0,068894
02/11/1994	-0,682614	0,765245	0,179367	0,056887
15/05/1996	-0,082525	0,971462	0,514824	0,121249
26/09/1998	-0,080298	0,697571	0,185353	0,036994
28/10/1998	-0,095061	0,745821	0,184037	0,036381
04/10/2001	-0,094530	0,829411	0,198026	0,051810
06/07/2003	-0,159512	2,608374	0,231933	0,084994
12/10/2004	-0,272261	0,926021	0,176312	0,082677
15/10/2005	-0,365243	0,957076	0,152782	0,065076
30/07/2006	-0,278328	0,921830	0,252137	0,130051
22/01/2007	-0,277353	0,844919	0,213792	0,092123
21/09/2008	-0,191816	0,777999	0,177892	0,082459
24/09/2009	-0,173213	0,777641	0,192826	0,087177
27/11/2009	-0,200293	0,801963	0,219843	0,091745
29/08/2011	-0,173891	0,809880	0,187657	0,096050

Fonte: A Autora (2020).

Tabela A.3 – Estatística descritiva dos valores de SAVI.

Data das Imagens	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
28/11/1986	-0,152742	0,747730	0,227581	0,081167
23/05/1987	-0,125853	0,577918	0,285366	0,069980
24/06/1987	-0,124722	0,551846	0,212342	0,068204
16/06/1990	-0,183802	0,604676	0,252190	0,072732
17/12/1993	-0,066235	0,516312	0,174085	0,050262
02/11/1994	-0,148499	0,557965	0,151758	0,046010
15/05/1996	-0,066928	0,673799	0,374769	0,082065
26/09/1998	-0,063304	0,515694	0,155371	0,029271
28/10/1998	-0,078723	0,549868	0,155375	0,029335
04/10/2001	-0,082898	0,583351	0,165053	0,039938
06/07/2003	-0,149052	0,632805	0,172786	0,063341
12/10/2004	-0,209847	0,618193	0,140536	0,060636
15/10/2005	-0,517043	0,674372	0,121667	0,048526
30/07/2006	-0,280080	0,598988	0,187967	0,089042
22/01/2007	-0,463160	0,591620	0,165884	0,064106
21/09/2008	-0,186591	0,569998	0,153831	0,064153
24/09/2009	-0,162353	0,564910	0,166620	0,067854
27/11/2009	-0,171831	0,573425	0,181670	0,068803
29/08/2011	-0,152515	0,579260	0,156528	0,074690

Fonte: A Autora (2020).

Tabela A.4 – Estatística descritiva dos valores de SVI.

Data das Imagens	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
28/11/1986	-6,6813917	2,9147096	0,0064543	1,0037746
23/05/1987	-8,4950380	2,4285131	0,0065362	0,9926616
24/06/1987	-6,9991970	2,9133661	0,0062873	1,0015643
16/06/1990	-7,9894605	2,7188365	0,0014989	0,9983645
17/12/1993	-6,1848159	5,6134171	-0,0002836	0,9975894
02/11/1994	-8,9653168	6,2932186	0,0027149	0,9908216
15/05/1996	-8,3499413	1,9489559	0,0042857	0,9963339
26/09/1998	-9,0070791	6,9747844	0,0045370	0,9964297
28/10/1998	-10,0479832	8,6227808	0,0011827	0,9964735
04/10/2001	-7,6536894	6,7148747	0,0020155	0,9980863
06/07/2003	-7,1127658	4,7259898	0,0016676	0,9956941
12/10/2004	-7,6444478	5,3606968	-0,0013344	1,0023366
15/10/2005	-15,0682793	6,8018079	0,0010480	0,9964867
30/07/2006	-6,0306015	3,1524670	0,0033021	0,9977668
22/01/2007	-7,0456834	4,0816636	0,0065210	0,9999953
21/09/2008	-6,7530179	4,6874337	0,0025837	0,9983040
24/09/2009	-6,1313081	4,2229781	0,0003813	0,9982570
27/11/2009	-6,2358413	3,7812452	-0,0053302	0,9959044
29/08/2011	-5,5628490	3,7735505	0,0042832	0,9959797

Fonte: A Autora (2020).

Tabela A.5 – Estatística descritiva dos valores de VCI.

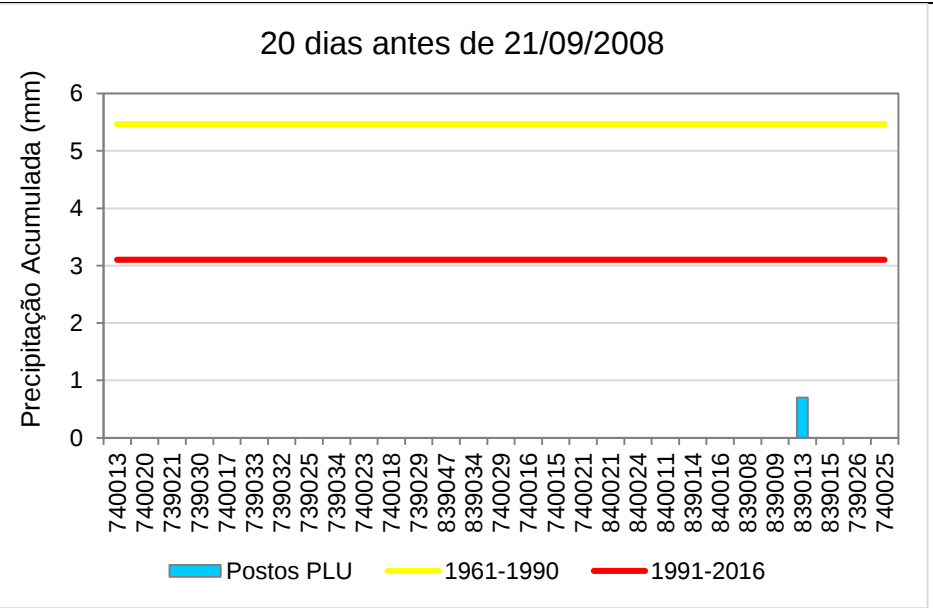
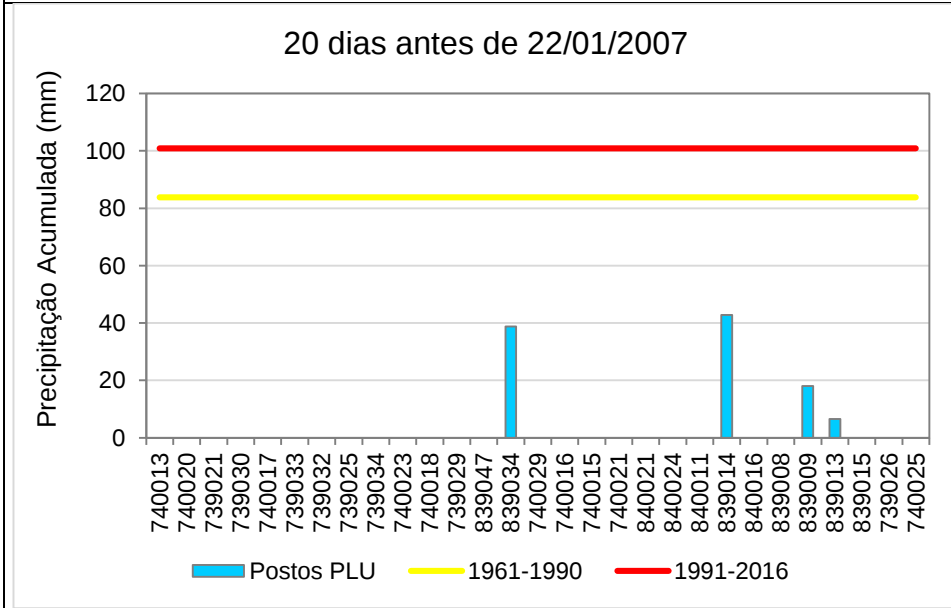
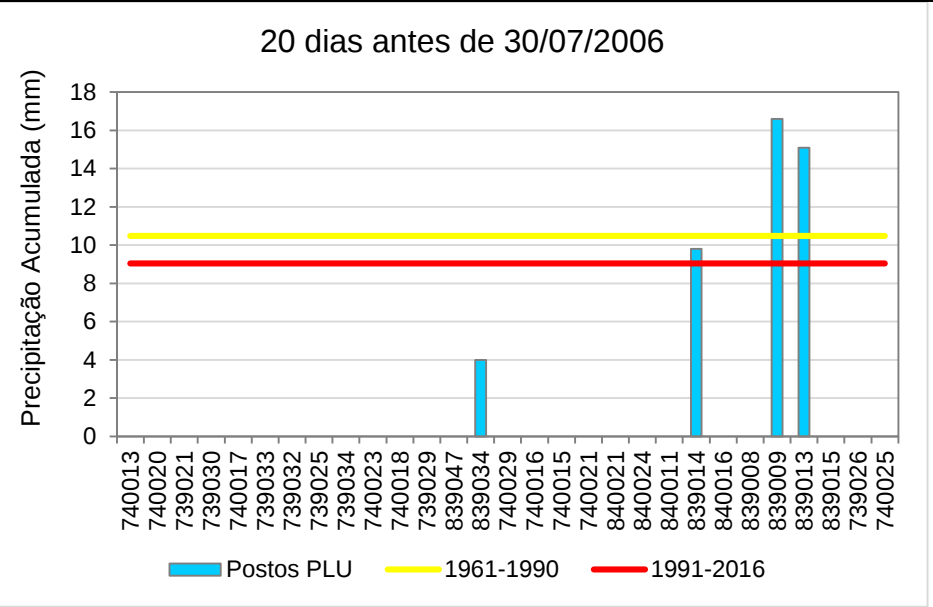
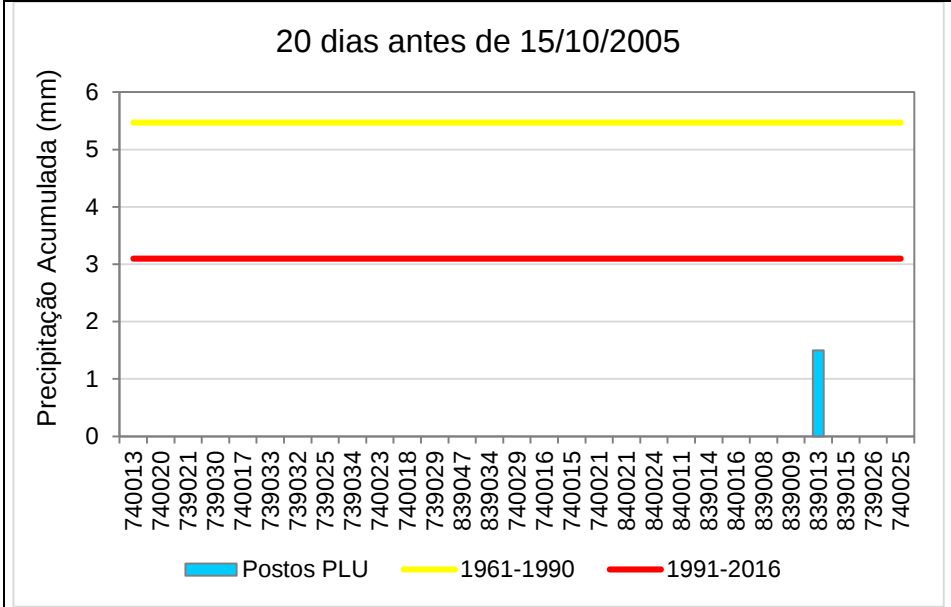
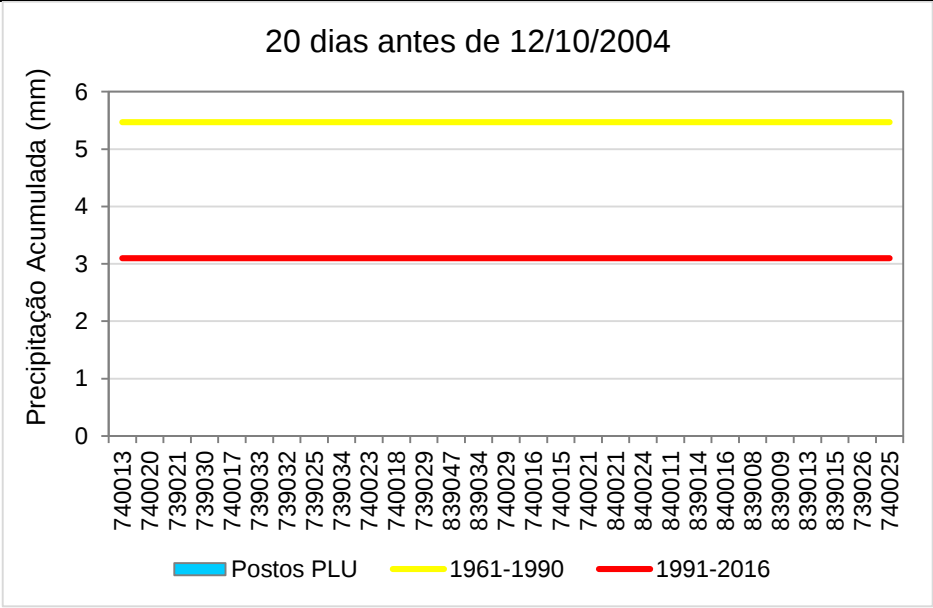
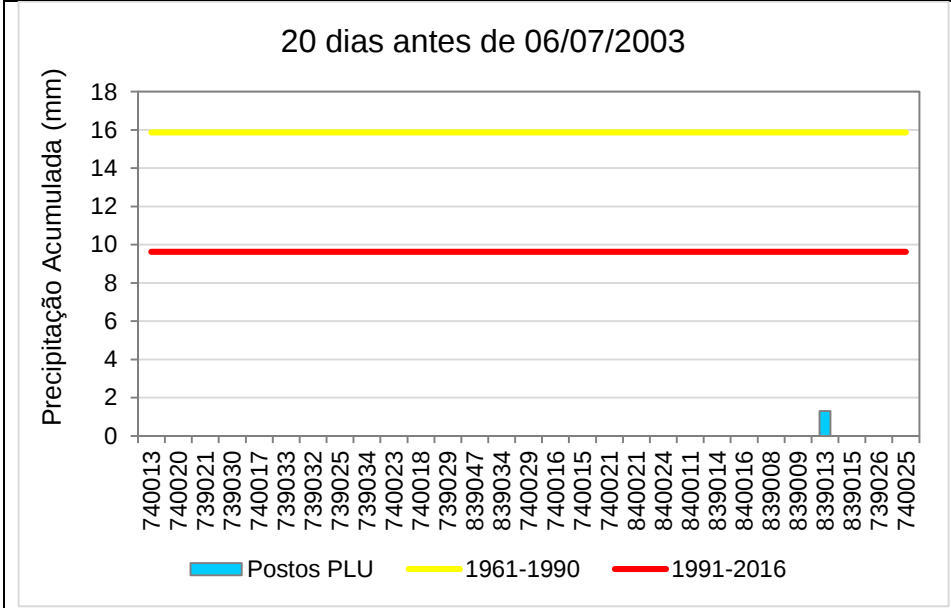
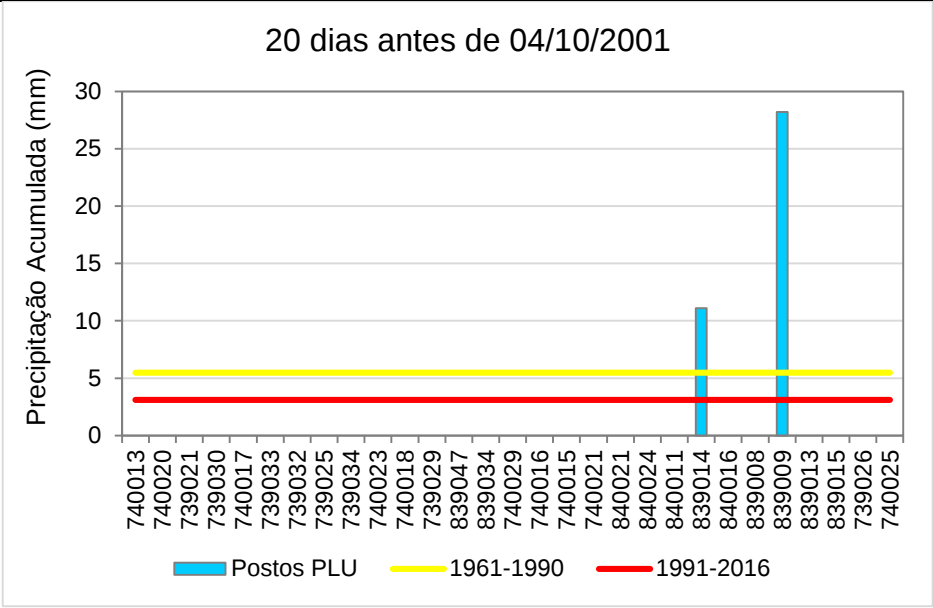
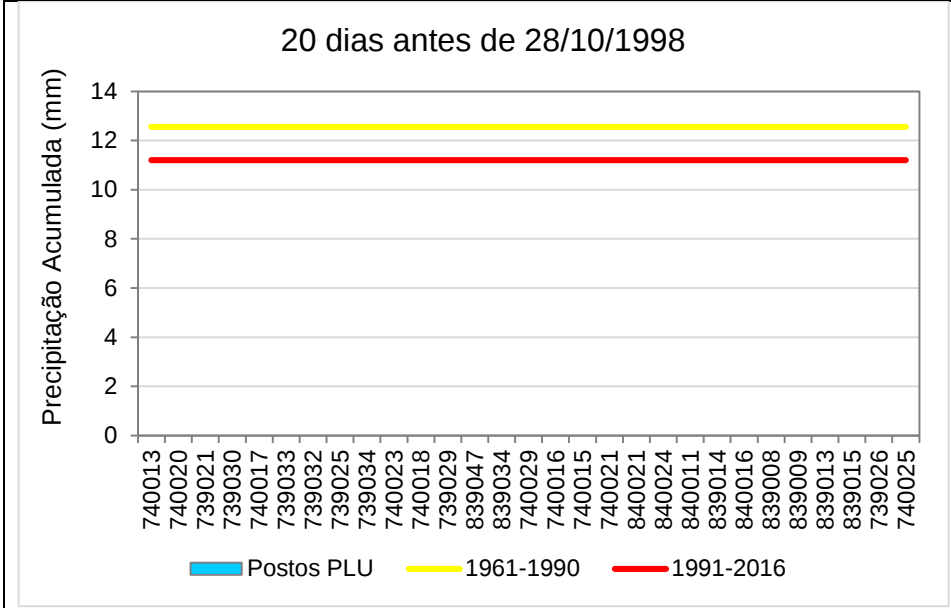
Data das Imagens	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
28/11/1986	30,8127022	91,4153214	73,0487037	6,3391754
23/05/1987	5,9671831	95,3354568	75,5206635	8,1212096
24/06/1987	24,6006279	86,2775192	68,1894059	6,2318263
16/06/1990	14,1975765	98,8524017	77,3703908	7,8926054
17/12/1993	36,0611458	92,2724457	65,5266232	4,7528977
02/11/1994	3,8663242	97,1343918	58,6835765	6,0564147
15/05/1996	34,9229355	92,3174515	81,4800405	5,5524496
26/09/1998	17,7518673	79,3816223	52,5027390	3,8424633
28/10/1998	6,0132723	94,1074371	53,4281957	4,7016552
04/10/2001	11,1973448	99,8197784	58,4162026	6,1559967
06/07/2003	14,6804924	98,3568039	64,9652990	7,0375646
12/10/2004	5,2529187	98,5132828	60,0619624	7,1877925
15/10/2005	0,5834513	88,4627686	61,1356666	4,0041254
30/07/2006	8,8113527	98,8843155	67,9954430	9,7866863
22/01/2007	3,7453954	84,8261337	55,1321238	7,2865853
21/09/2008	12,6024160	97,4732208	62,7187346	7,4059021
24/09/2009	8,9504337	97,8567200	61,5997144	8,5714571
27/11/2009	15,4899340	96,3240433	65,7678067	8,0365724
29/08/2011	12,5481186	97,6016846	63,2640762	9,0732646

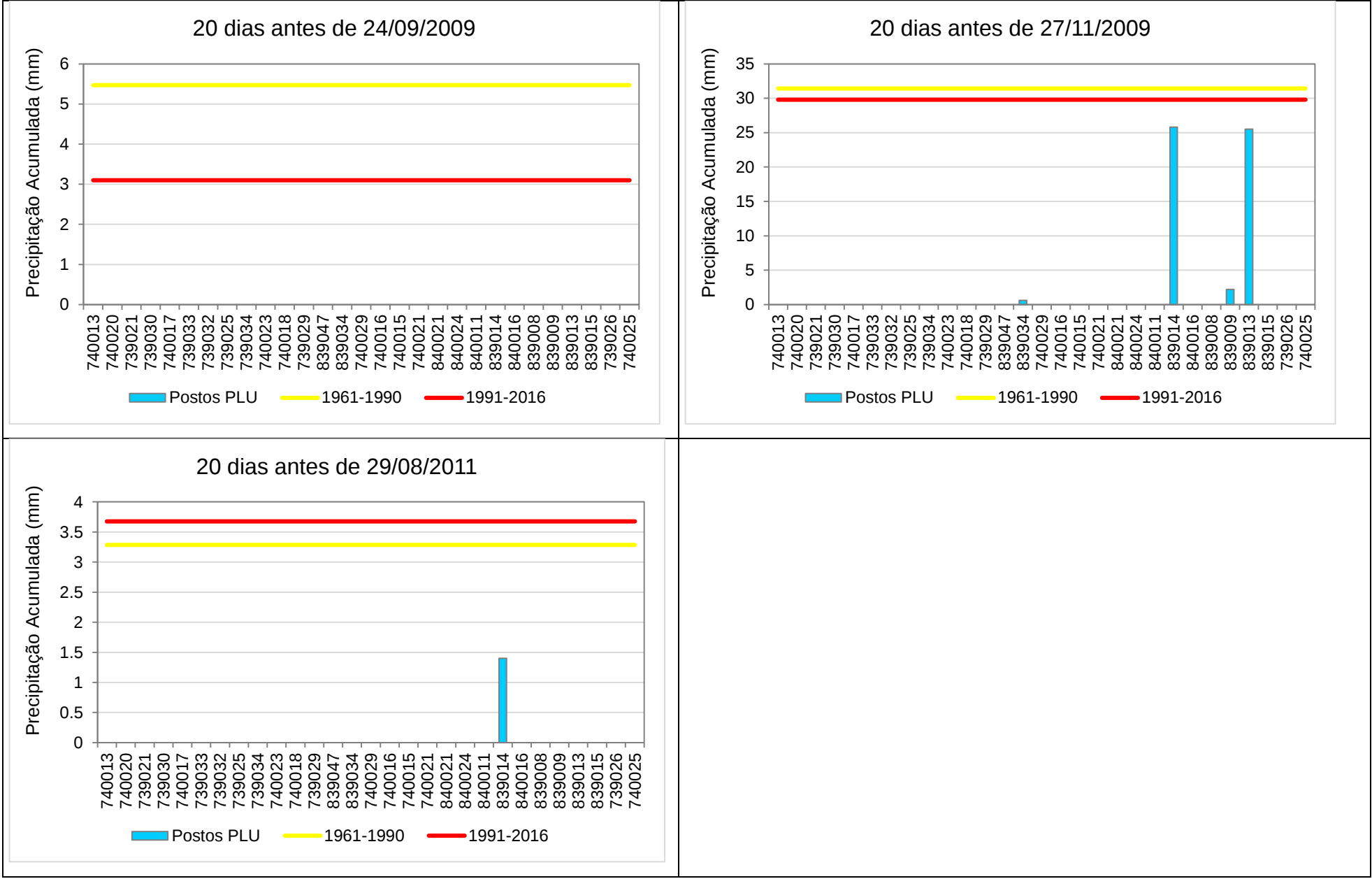
Fonte: A Autora (2020).

APÊNDICE B – HIDROGRAMA DA PRECIPITAÇÃO ACUMULADA NOS 20 DIAS ANTERIORES A DATA DA IMAGEM DE SATÉLITE EMPREGADA NOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO (NDVI, EVI, SAVI, SVI E VCI) NA BACIA DO RIO BRÍGIDA.

Figura B.1 – Hidrogramas de 20 dias antes das datas das imagens de satélite.



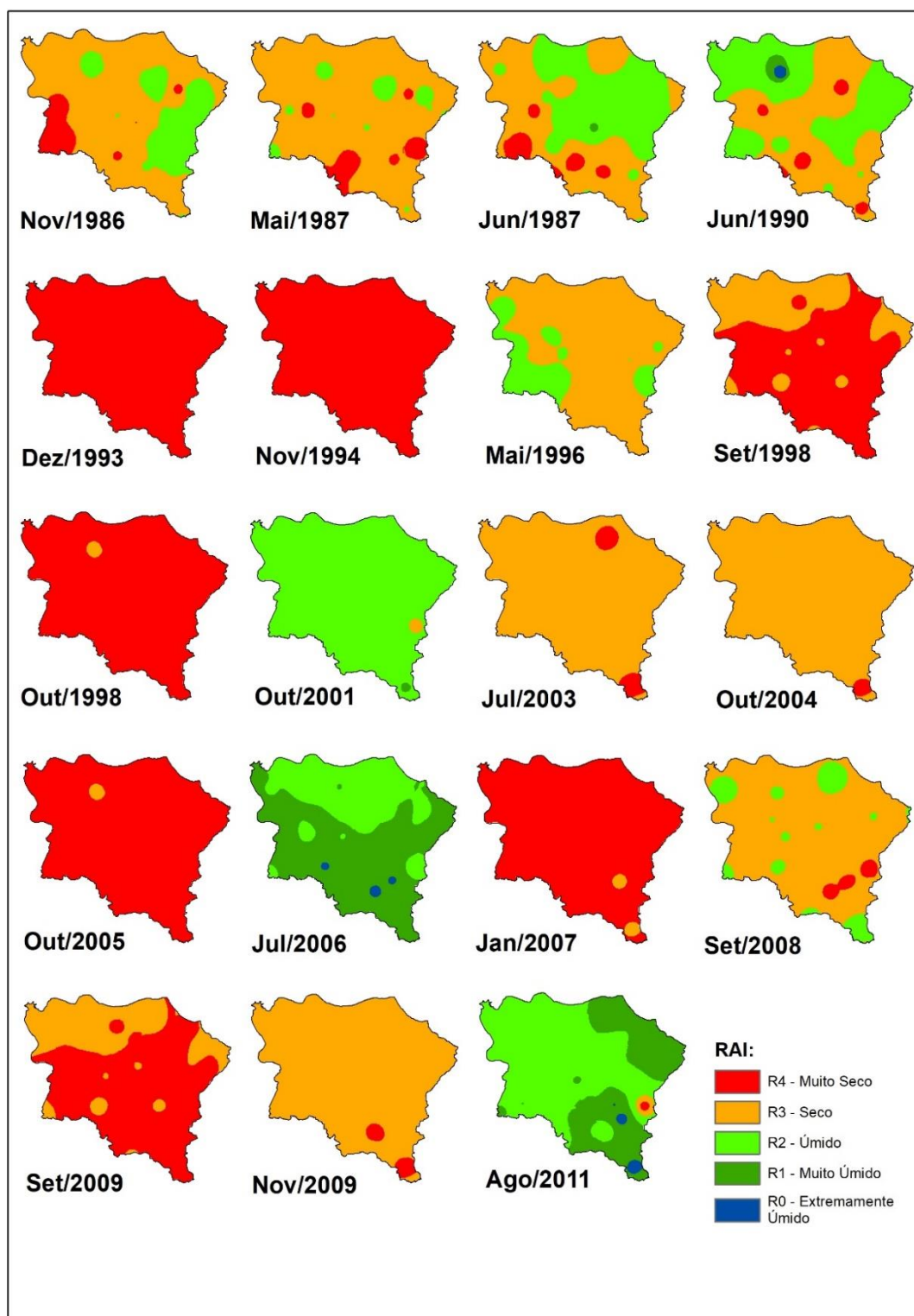




Fonte: A Autora (2020).

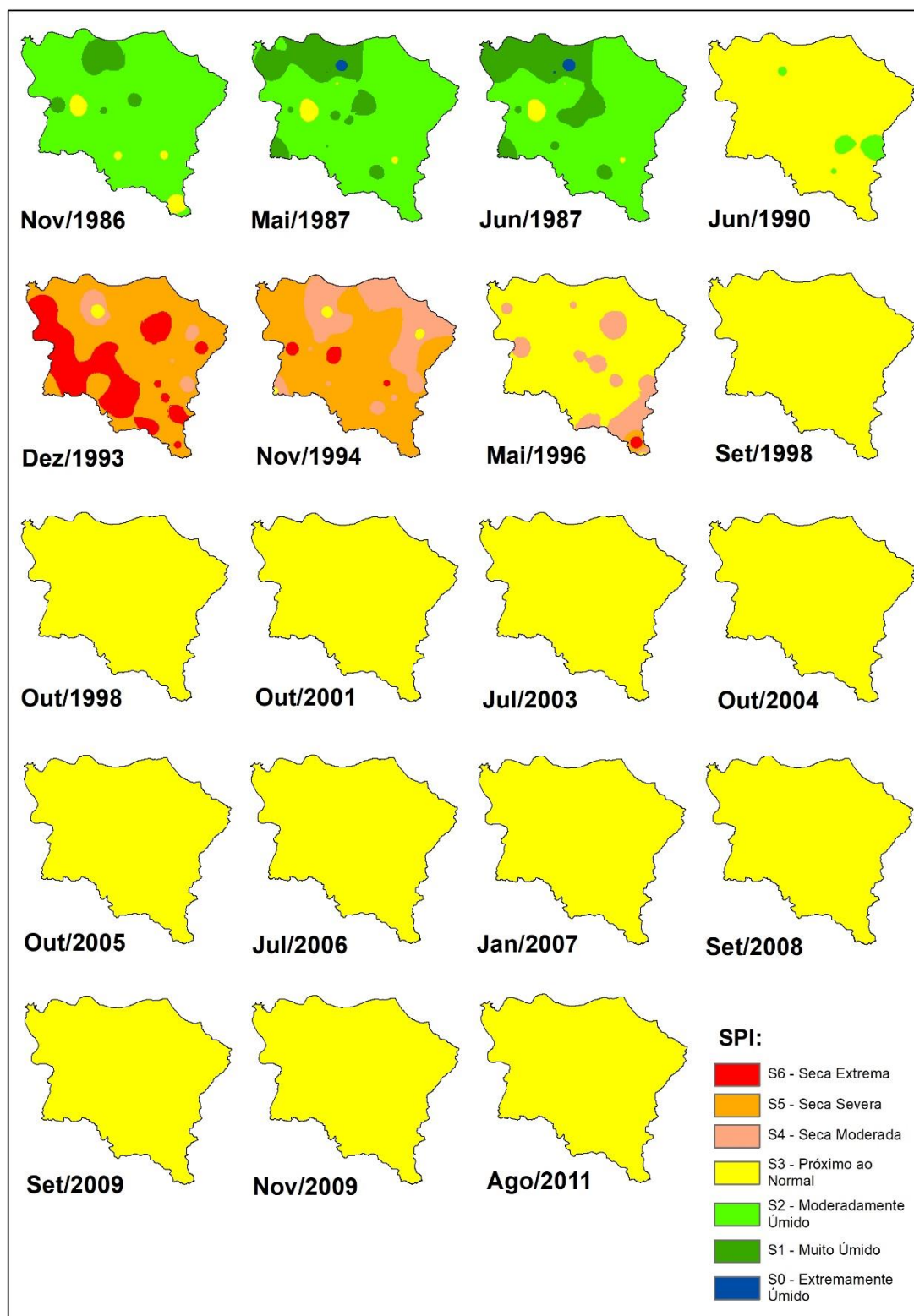
APÊNDICE C – INTERPOLAÇÕES IDW DOS ÍNDICES DE SECA EMPREGADOS NA CORRELAÇÃO ESPACIAL COM OS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO (NDVI, EVI, SAVI, SVI E VCI) NA BACIA DO RIO BRÍGIDA.

Figura C.1 – IDW do Índice de Anomalia de Chuva (RAI) no período de 1986-2011.



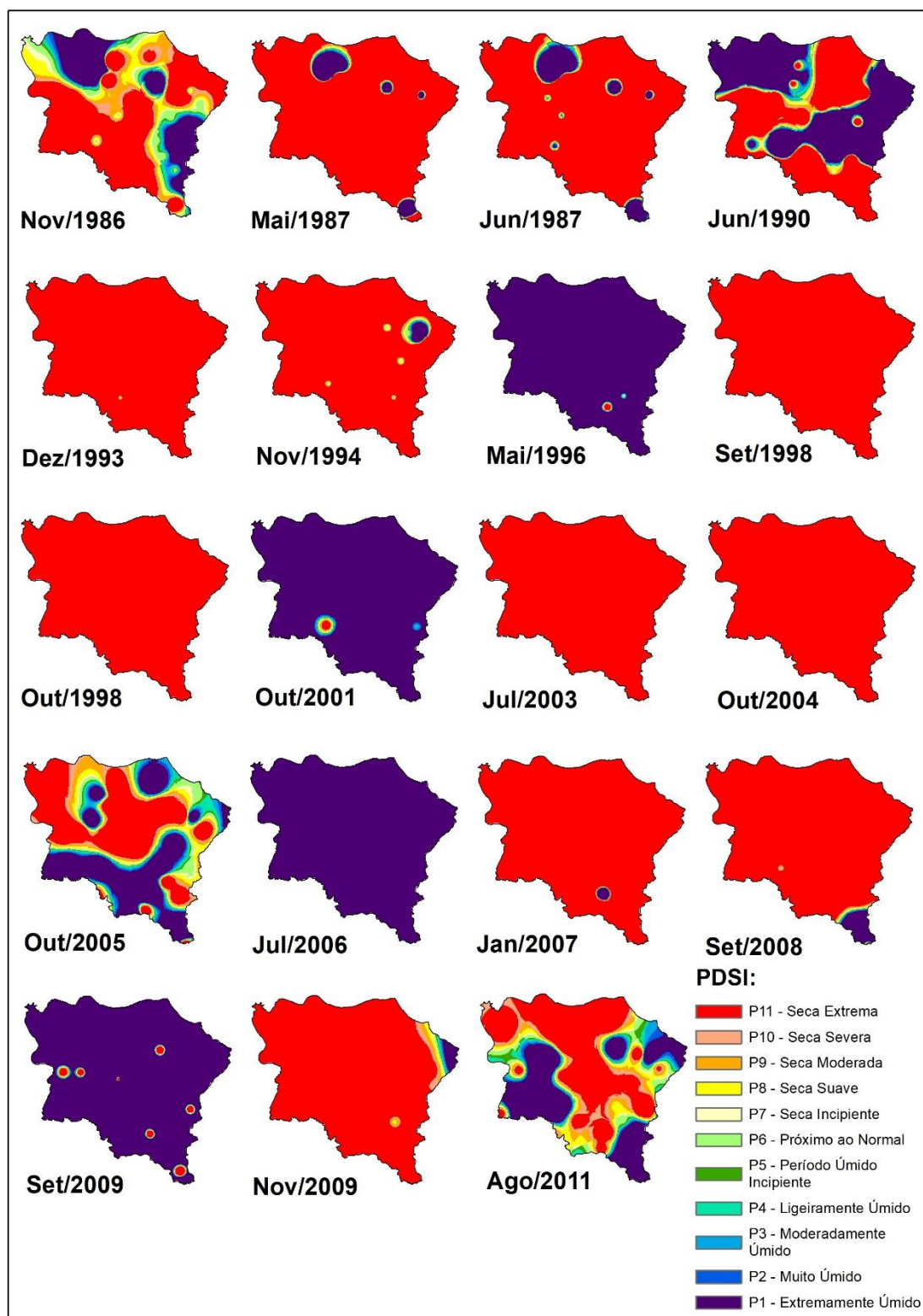
Fonte: A Autora (2020).

Figura C.2 – IDW do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) no período de 1986-2011.



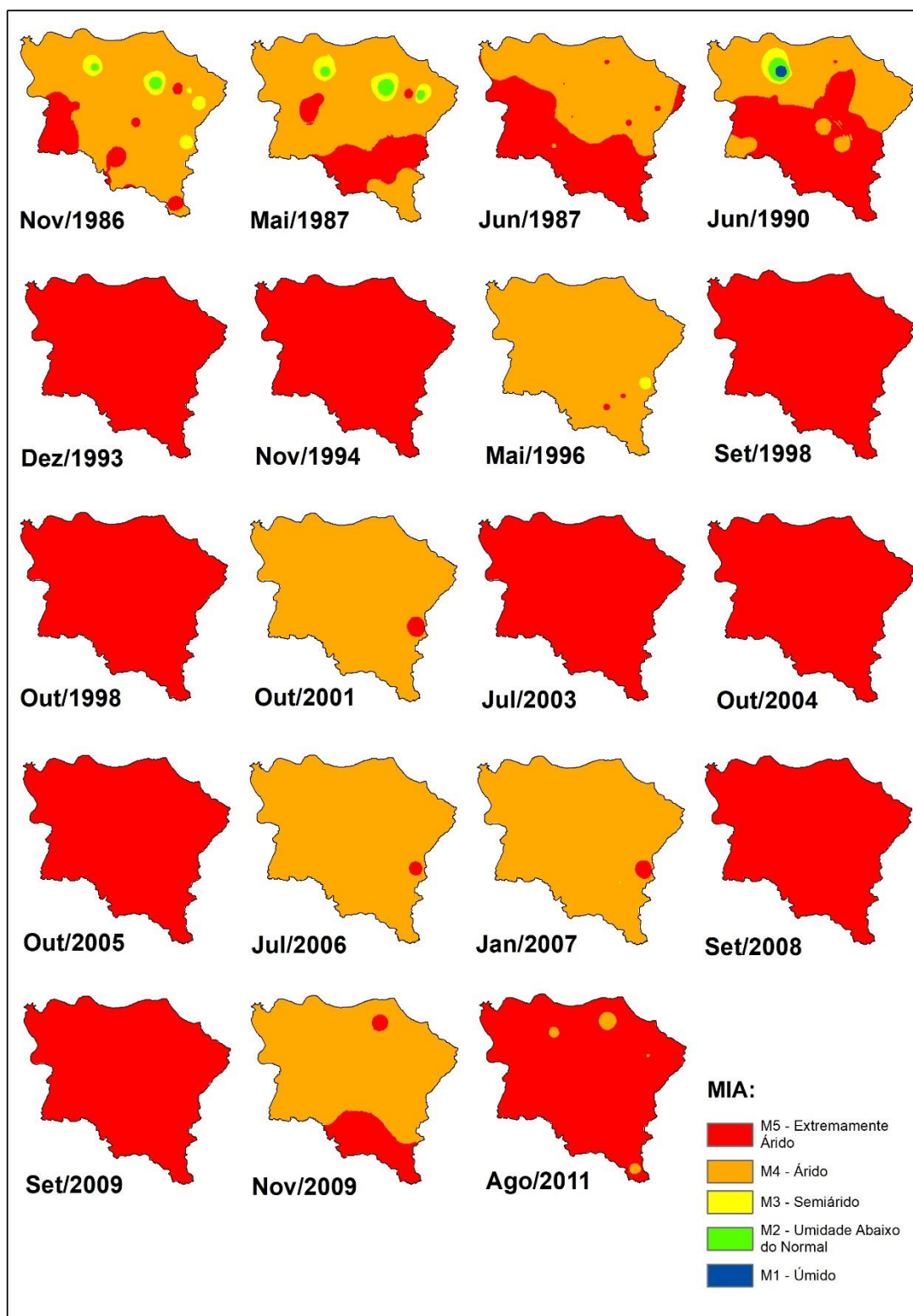
Fonte: A Autora (2020).

Figura C.3 – IDW do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) no período de 1986-2011.



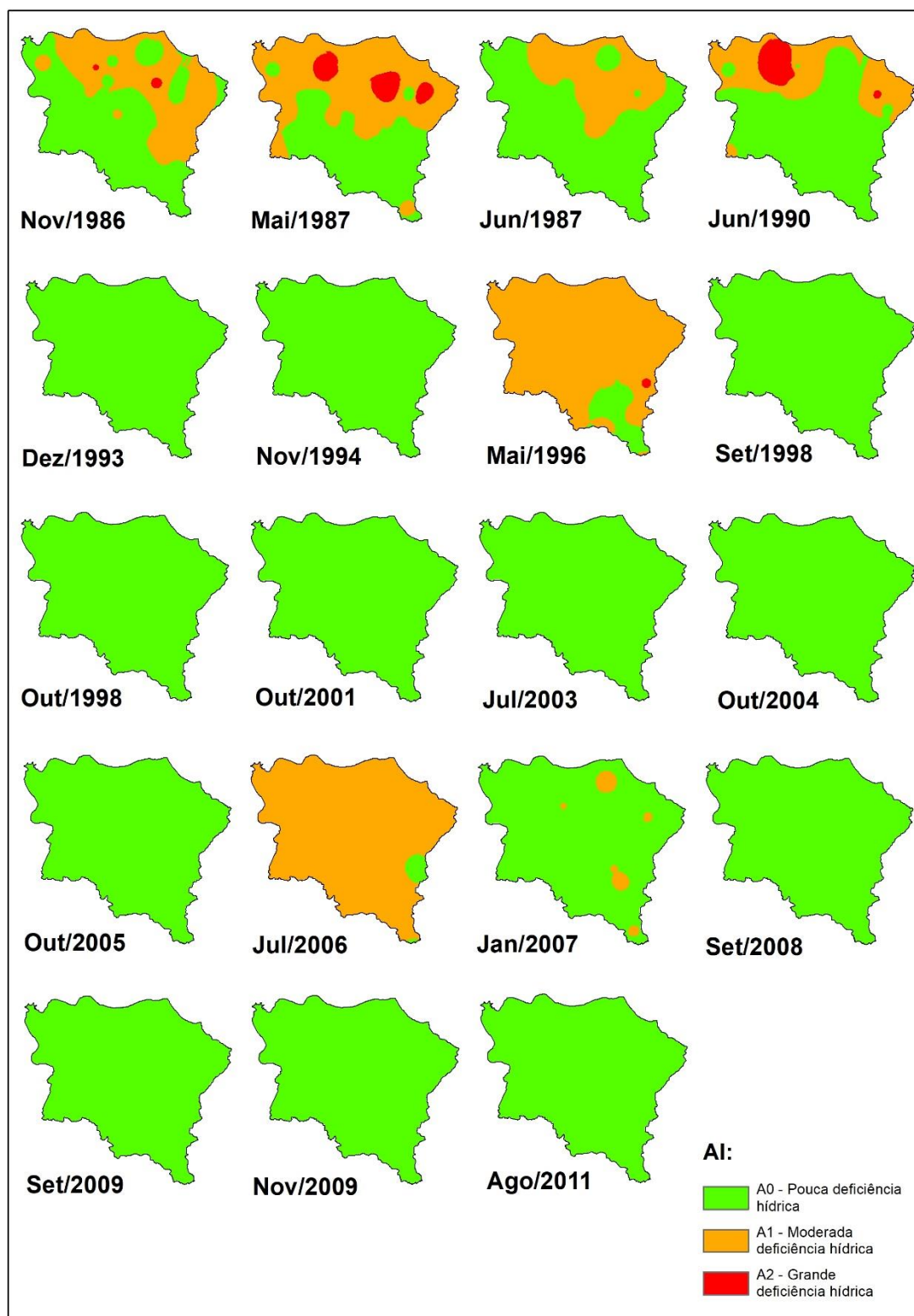
Fonte: A Autora (2020).

Figura C.4 – IDW do Índice de Aridez de Martonne (MIA) no período de 1986-2011.



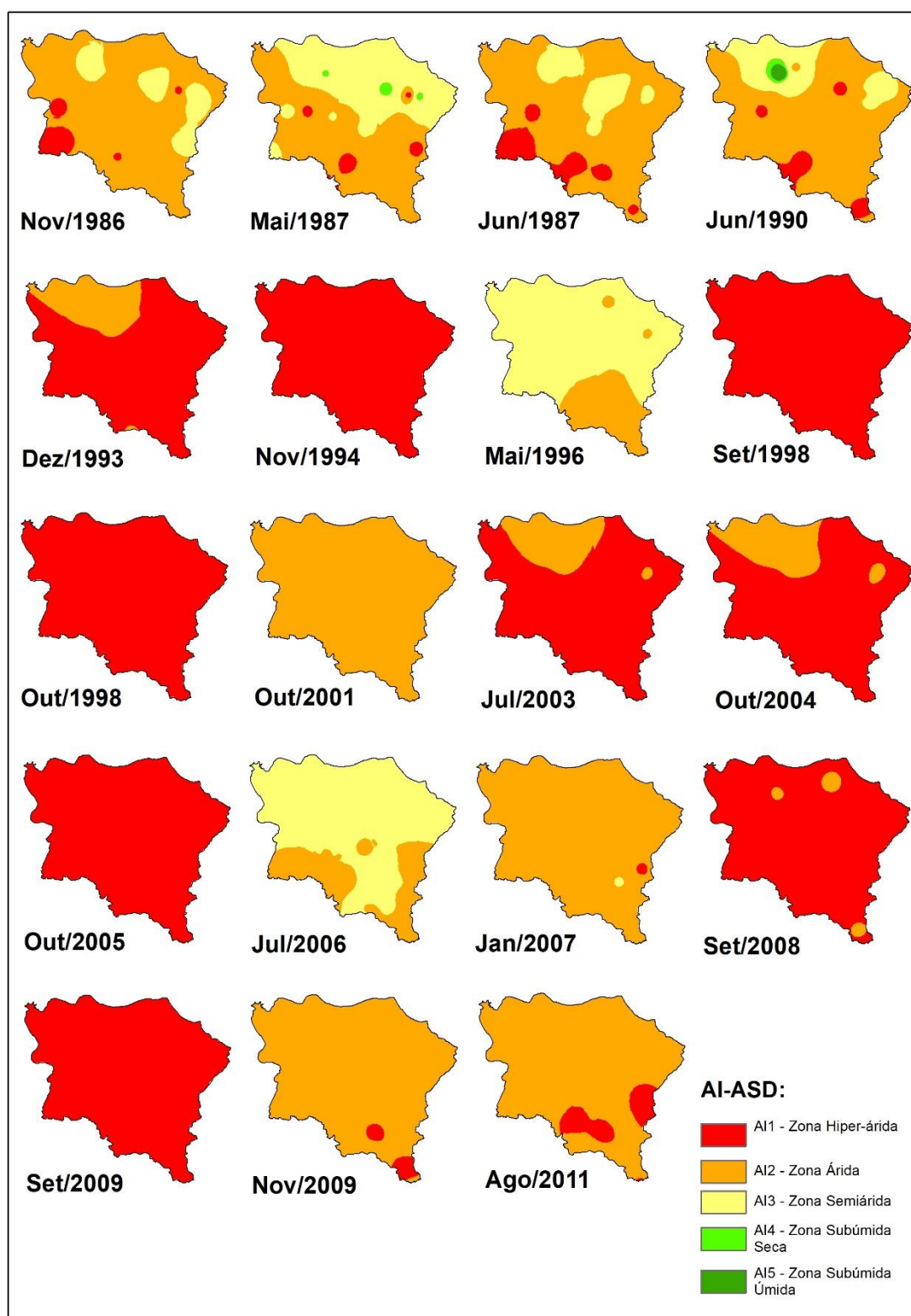
Fonte: A Autora (2020).

Figura C.5 – IDW do Índice de Aridez de Thornthwaite (AI) no período de 1986-2011.



Fonte: A Autora (2020).

Figura C.6 – IDW do Índice de Aridez de Áreas Suscetíveis a Desertificação (AI_{ASD}) no período de 1986-2011.



Fonte: A Autora (2020).

APÊNDICE D – CORRELAÇÃO PONTUAL ENTRE O ÍNDICES DE SECA X ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA BACIA DO RIO BRÍGIDA.

Tabela D.1 – Correlação pontual: RAI x EVI.

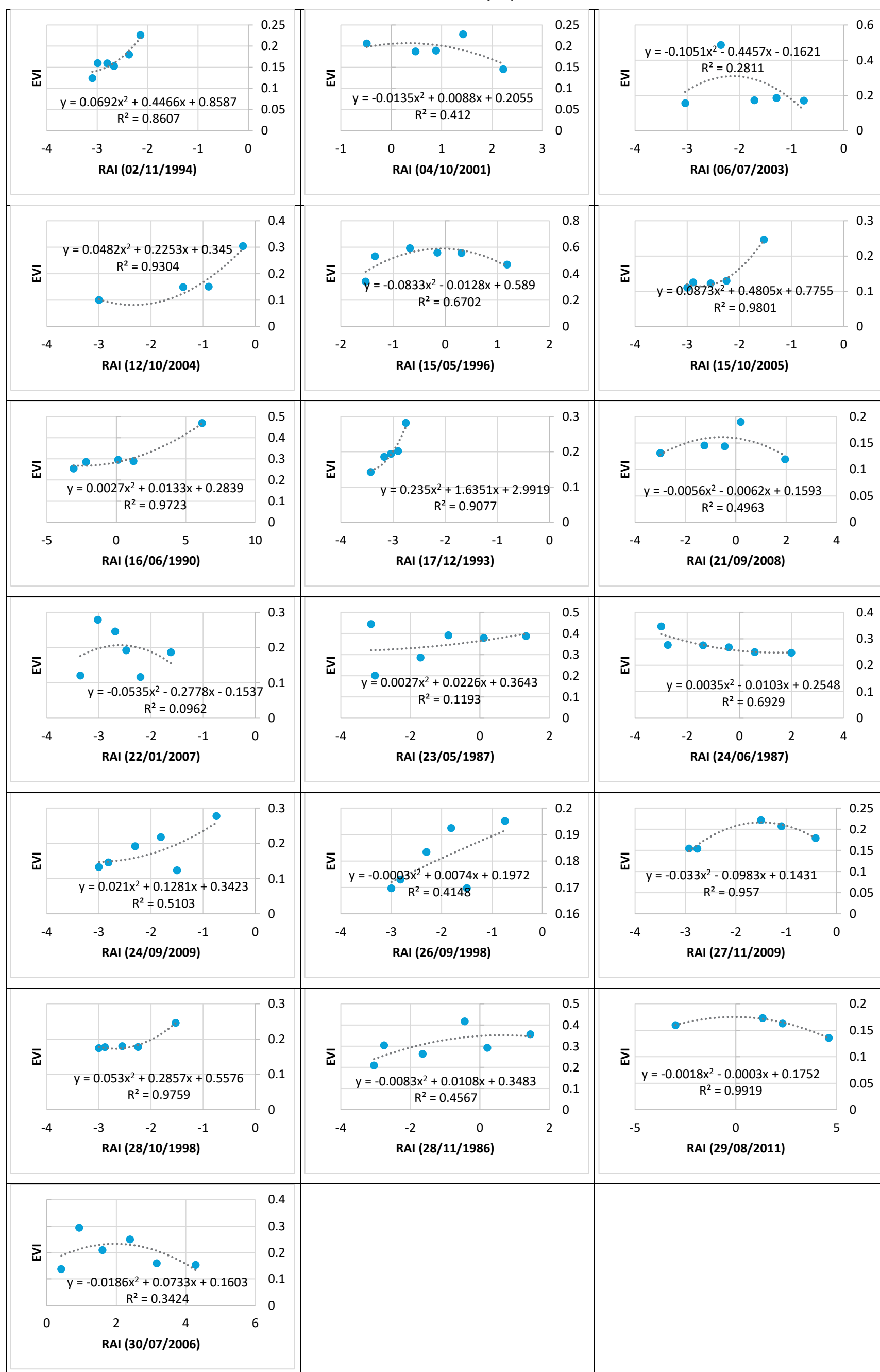


Tabela D.2 – Correlação pontual: RAI x NDVI.

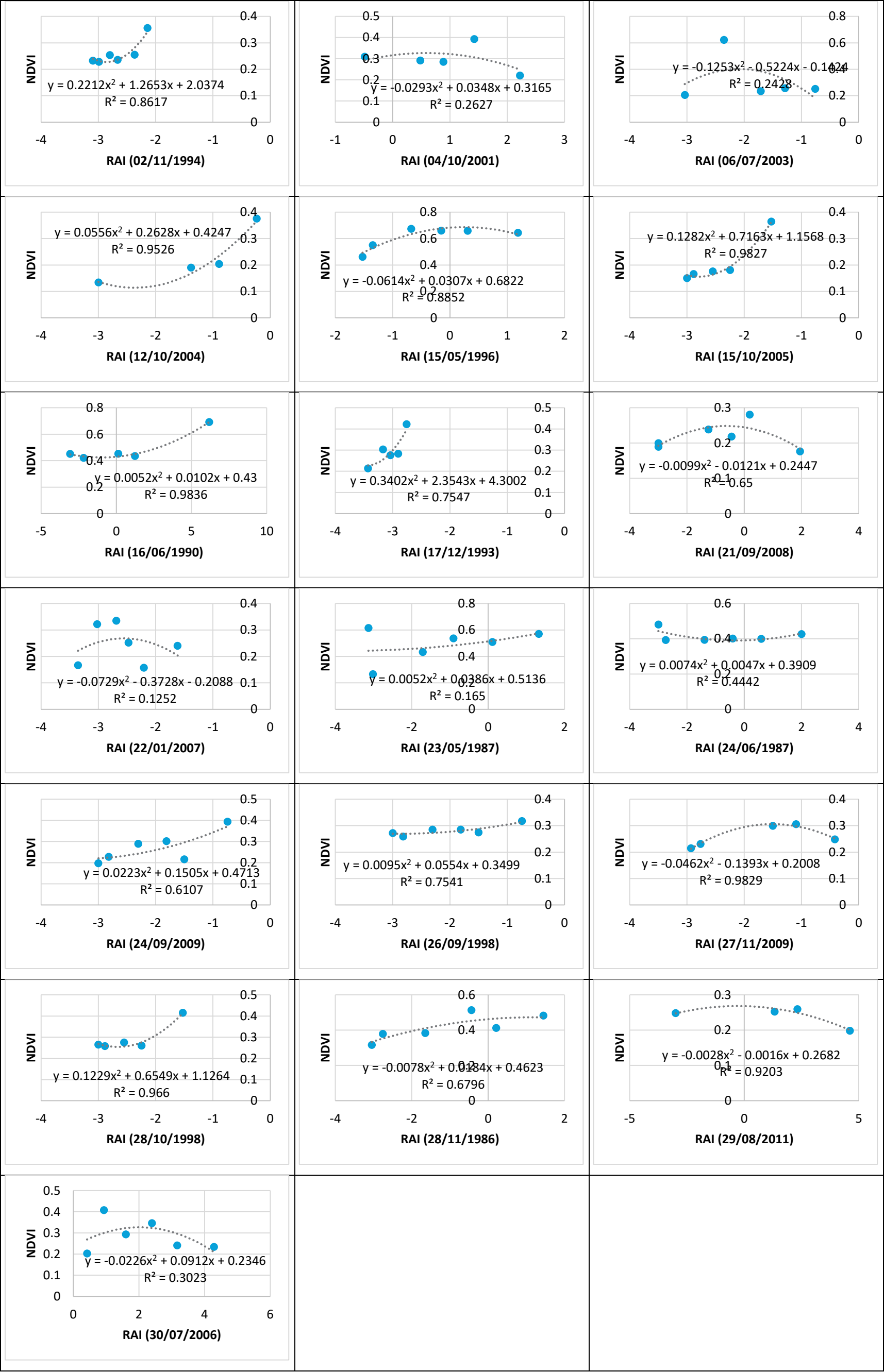


Tabela D.3 – Correlação pontual: RAI x SAVI.

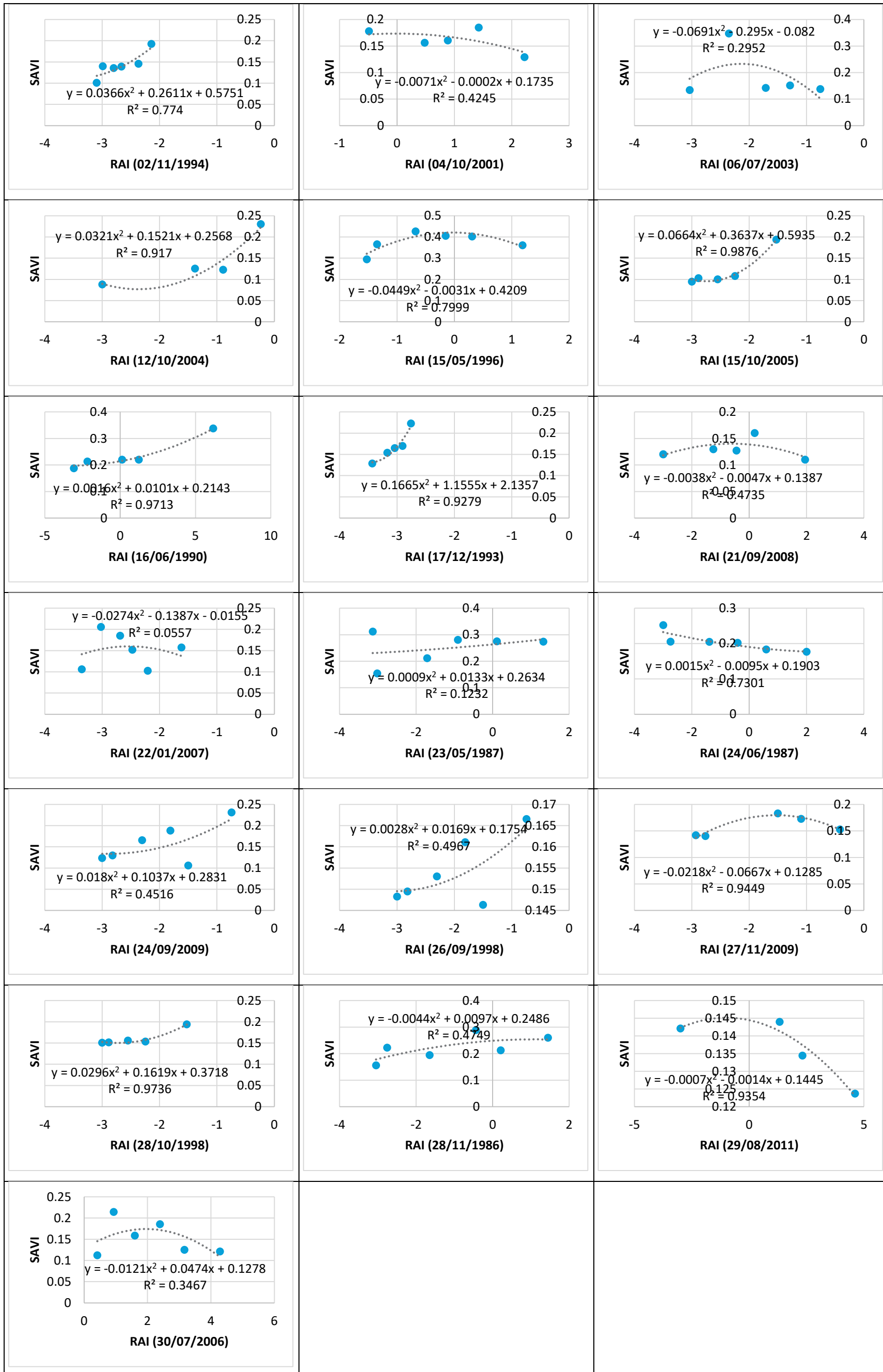


Tabela D.4 – Correlação pontual: RAI x SVI.

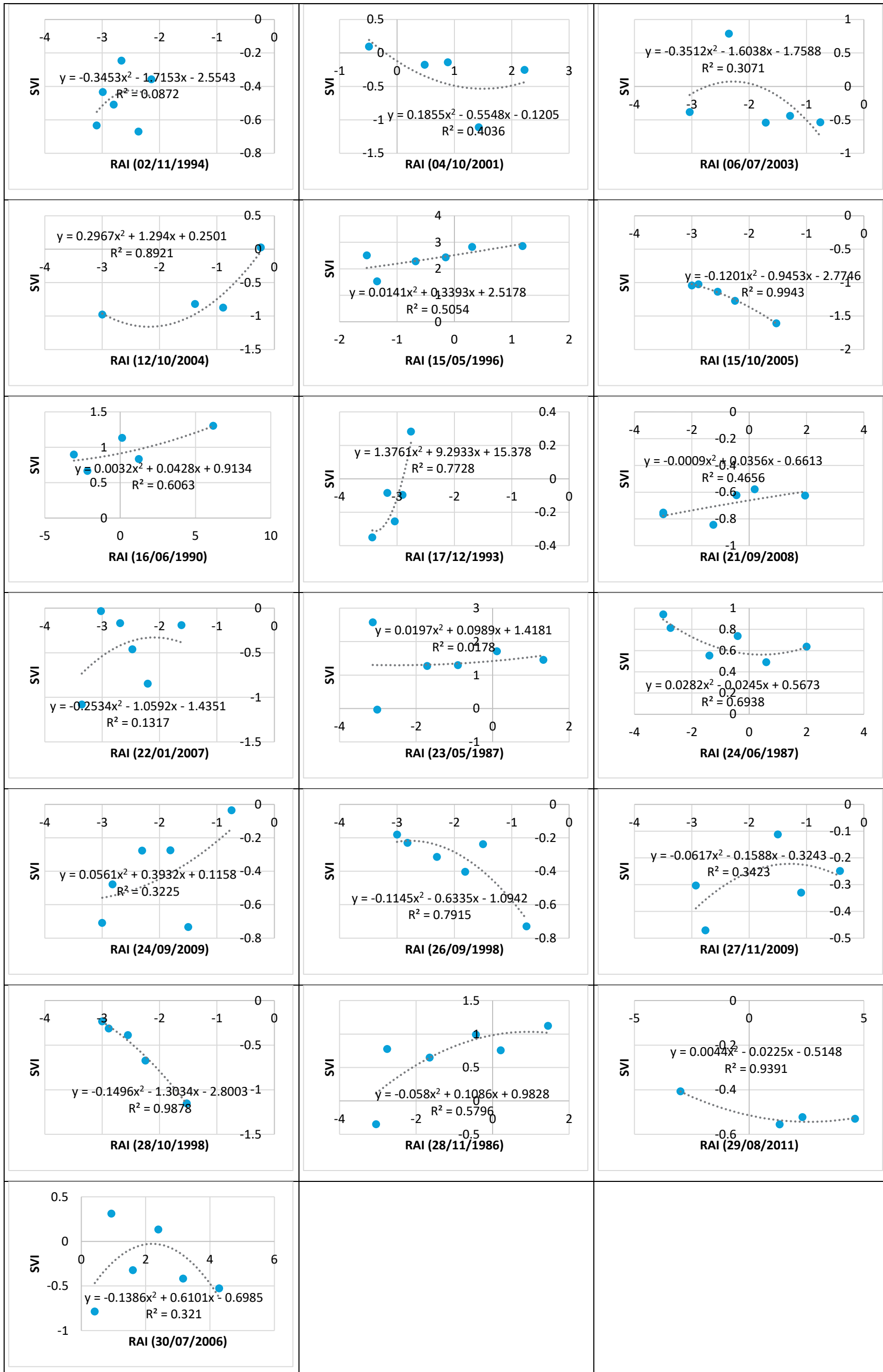


Tabela D.5 – Correlação pontual: RAI x VCI.

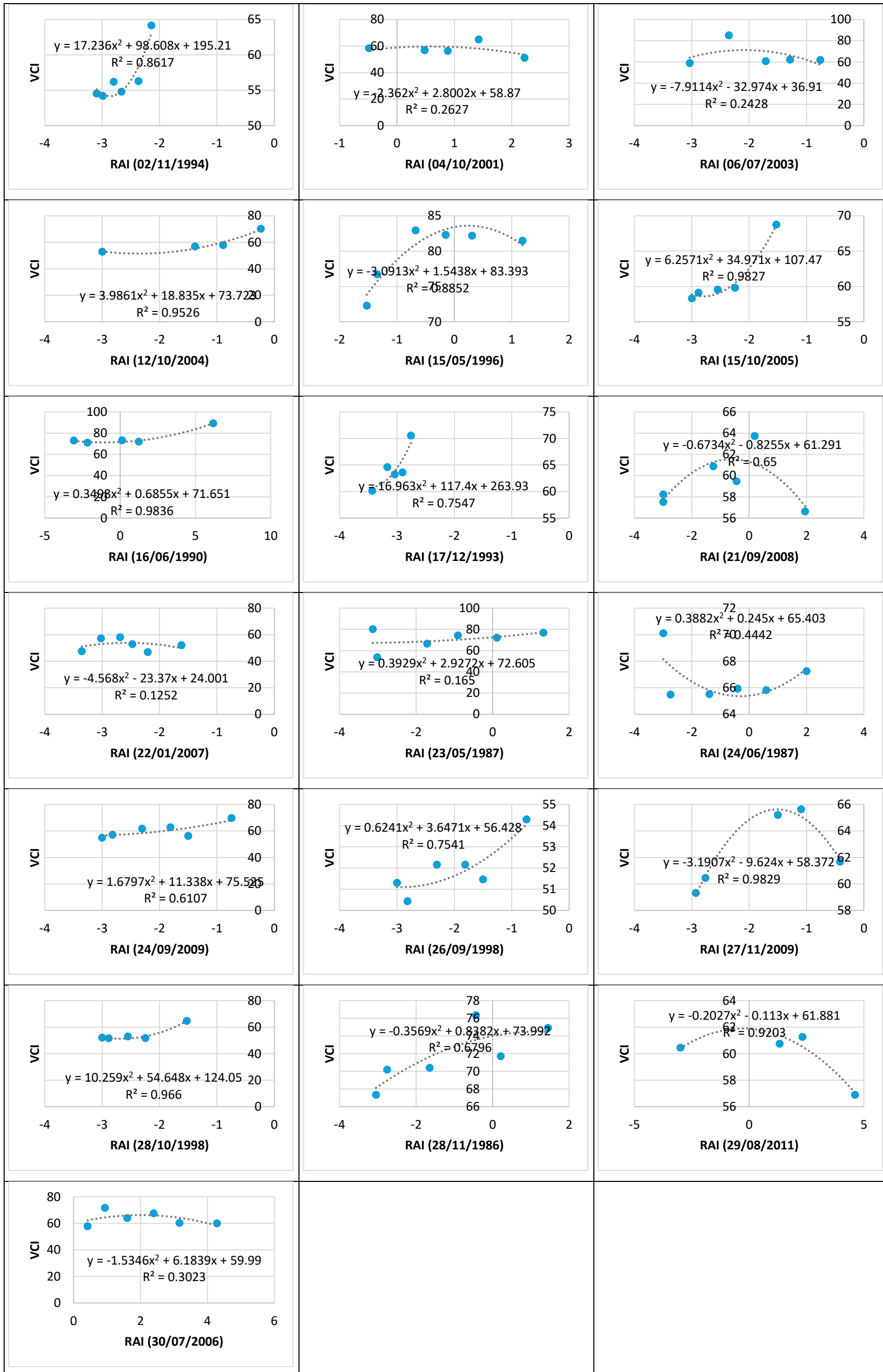


Tabela D.6 – Correlação pontual: SPI x EVI.

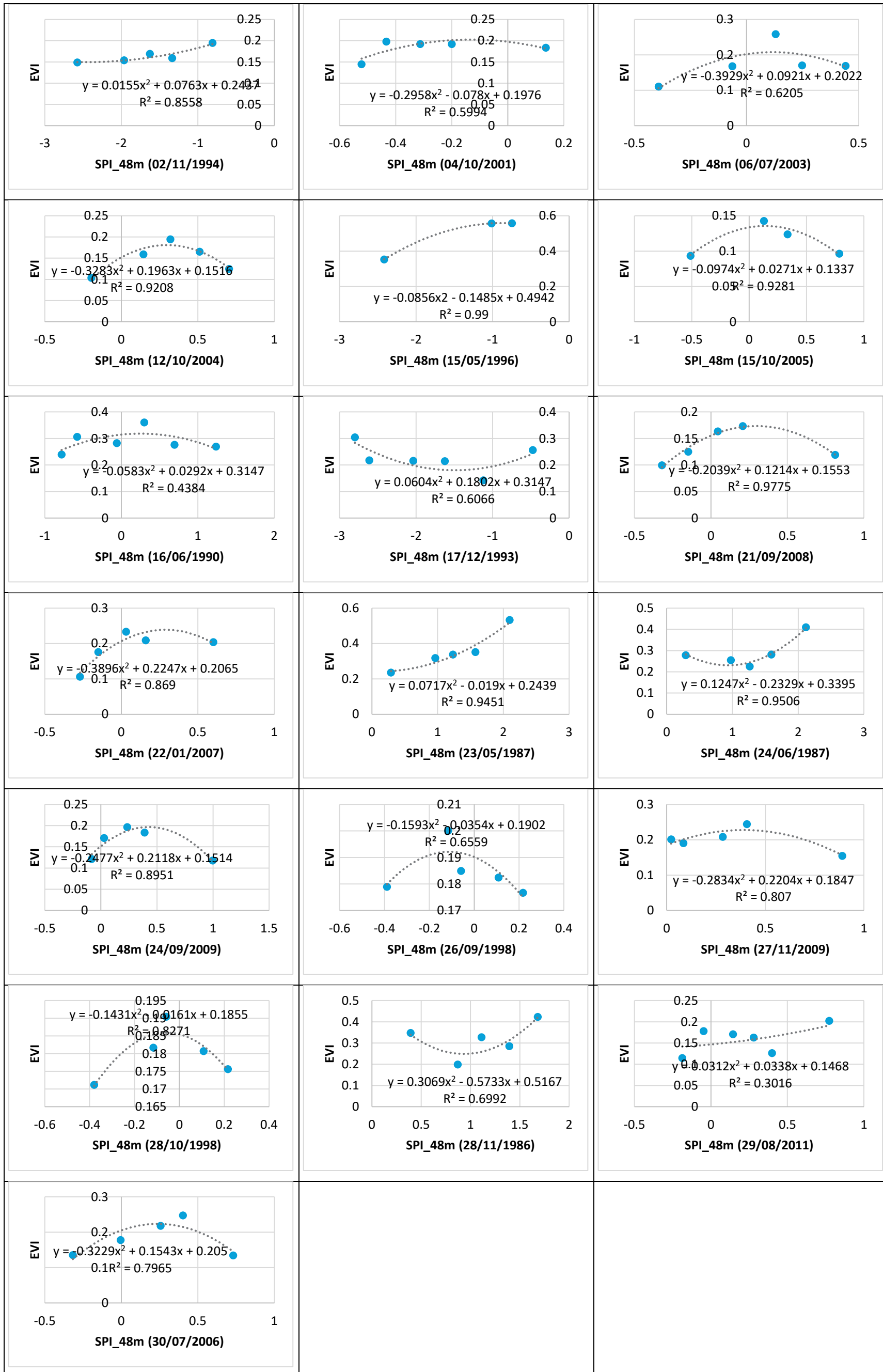


Tabela D.7 – Correlação pontual: SPI x NDVI.

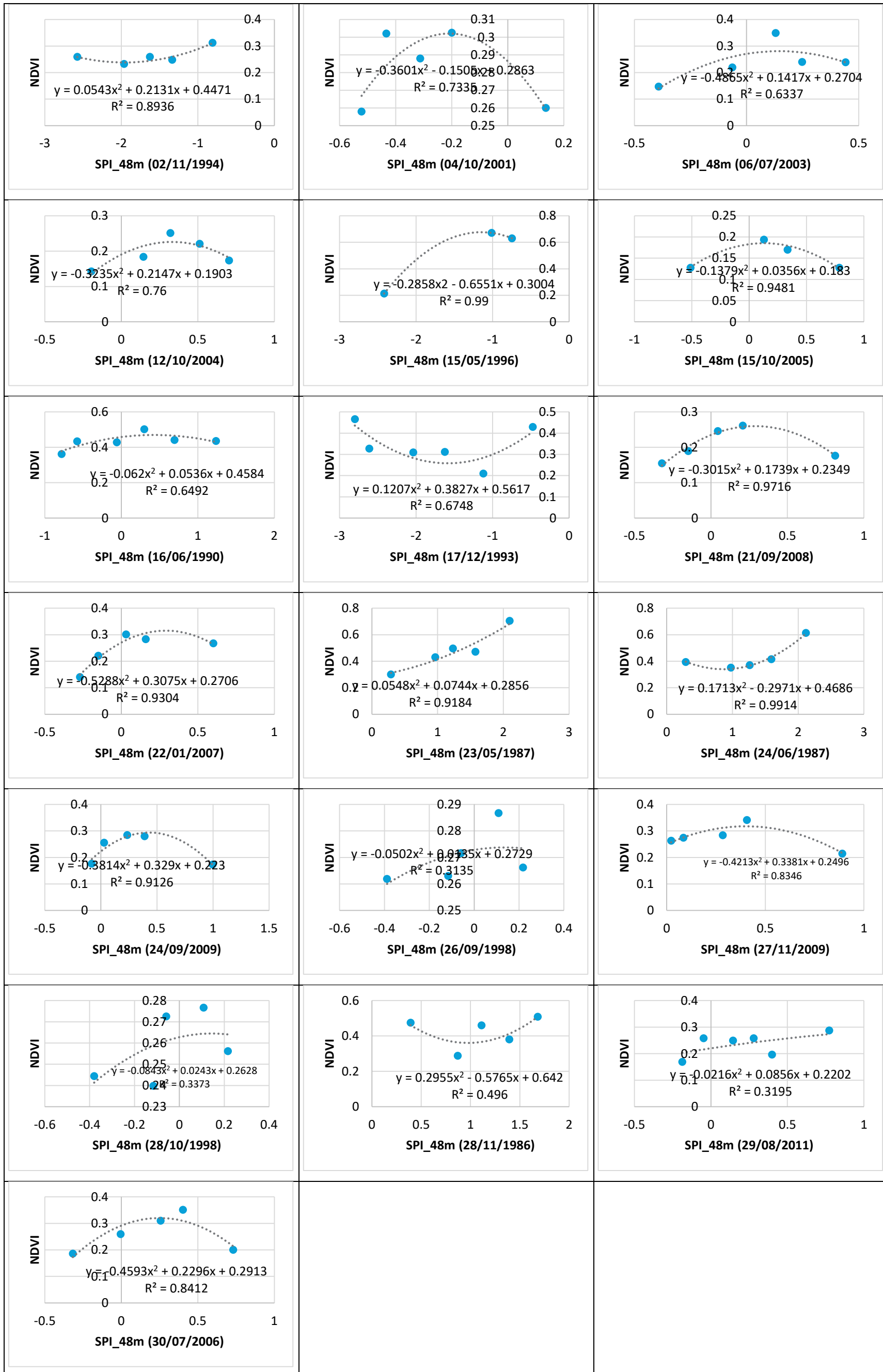


Tabela D.8 – Correlação pontual: SPI x SAVI.

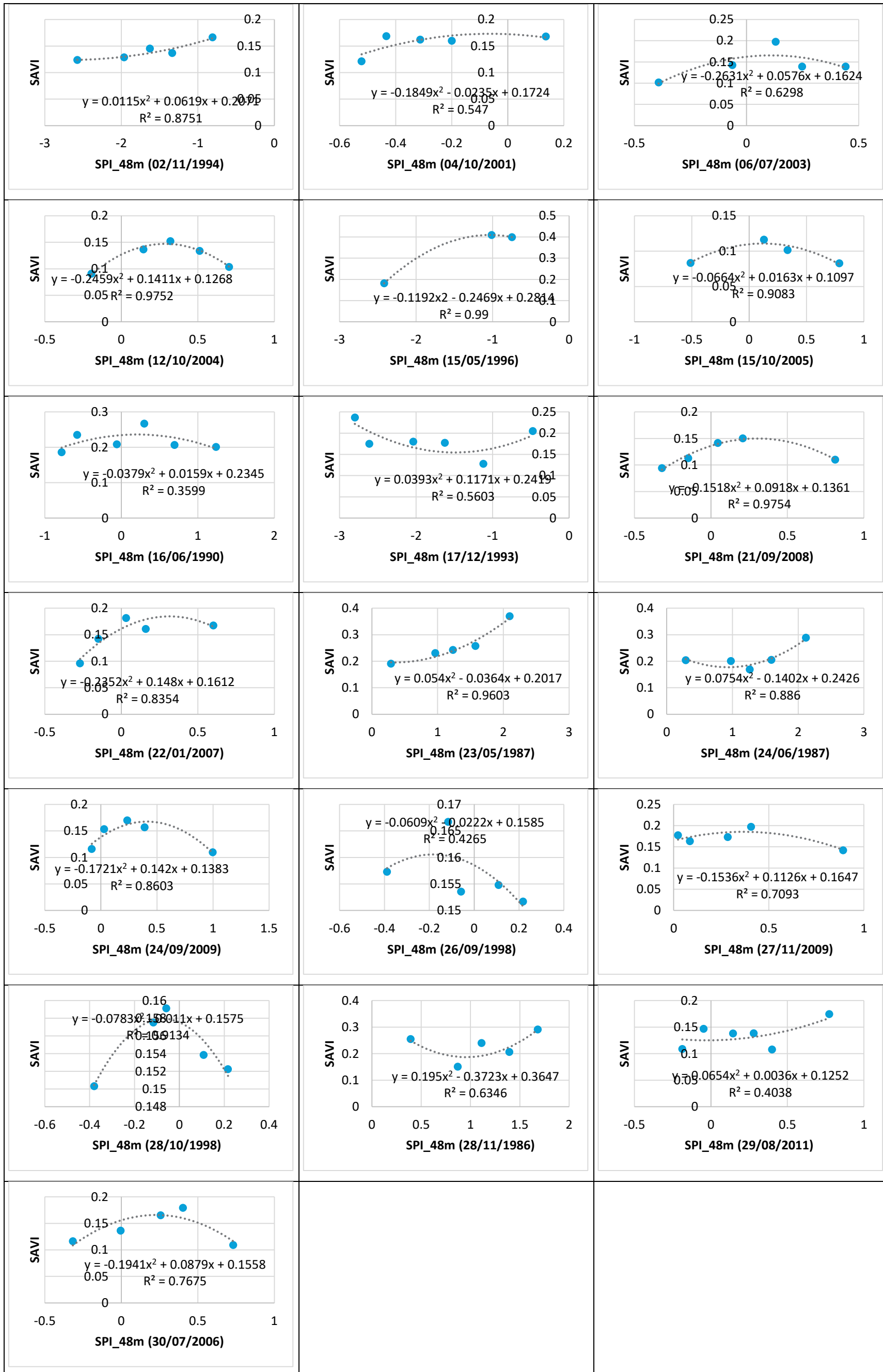


Tabela D.9 – Correlação pontual: SPI x SVI.

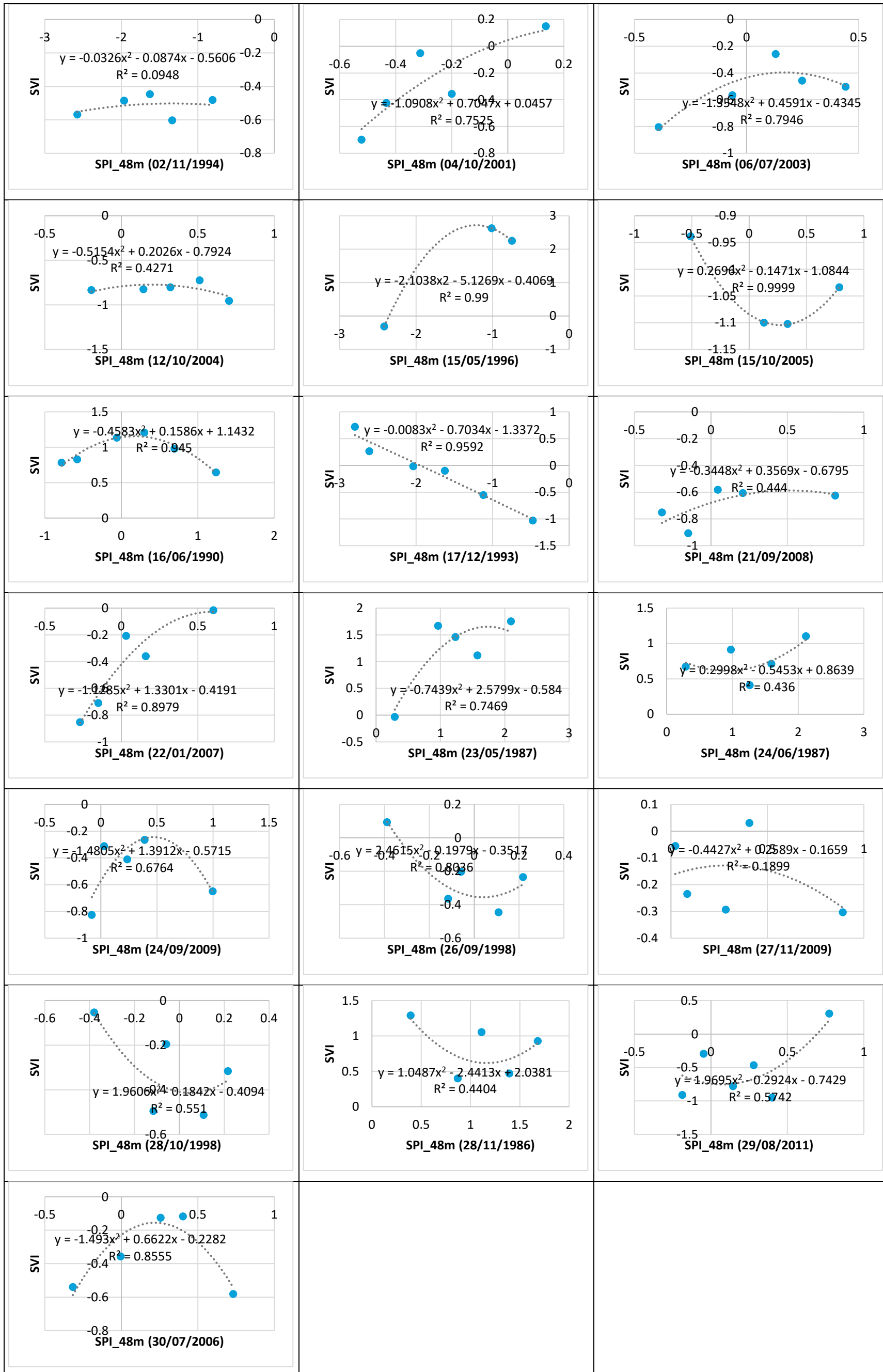


Tabela D.10 – Correlação pontual: SPI x VCI.

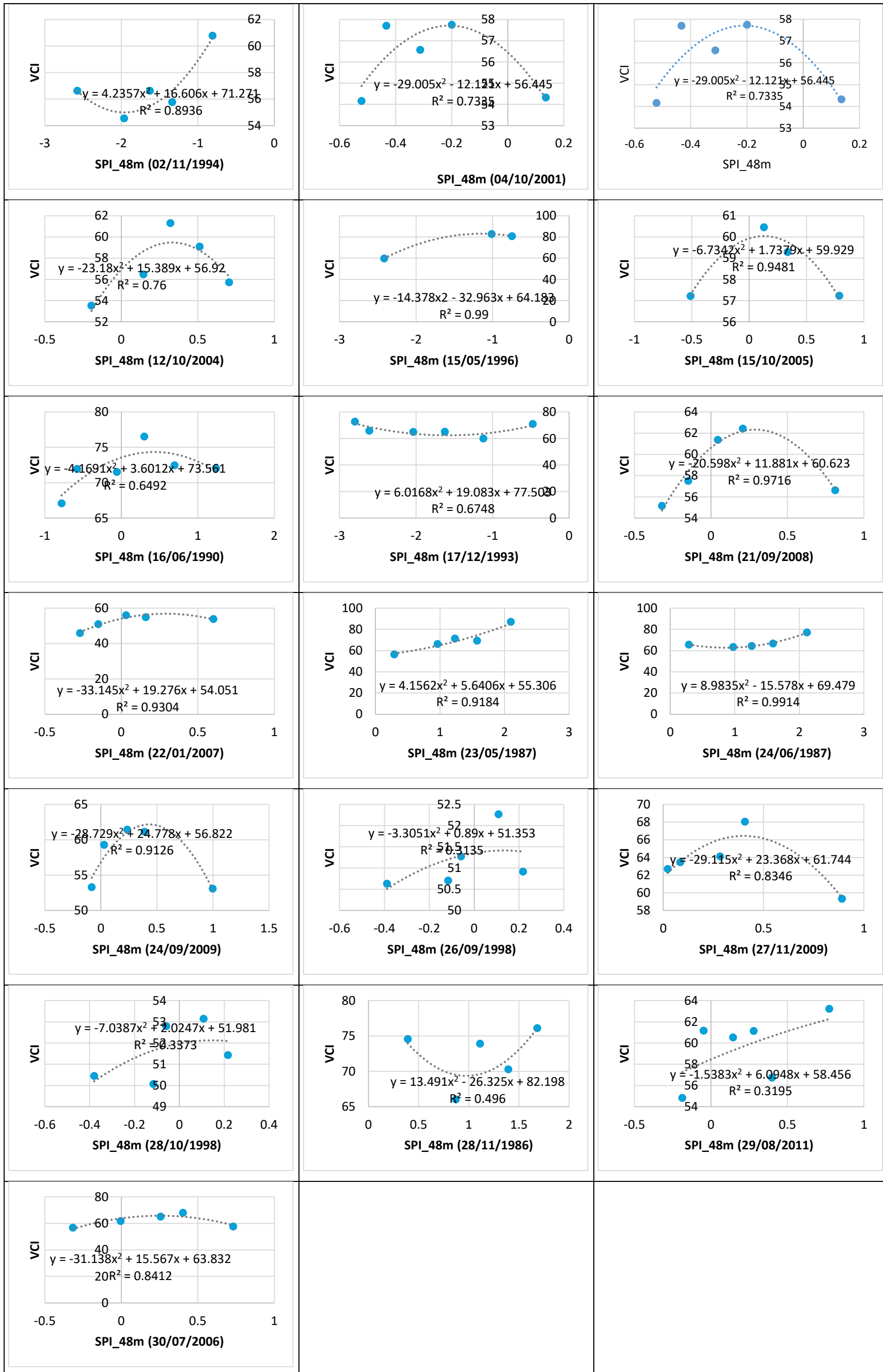


Tabela D.11 – Correlação pontual: PDSI x EVI.

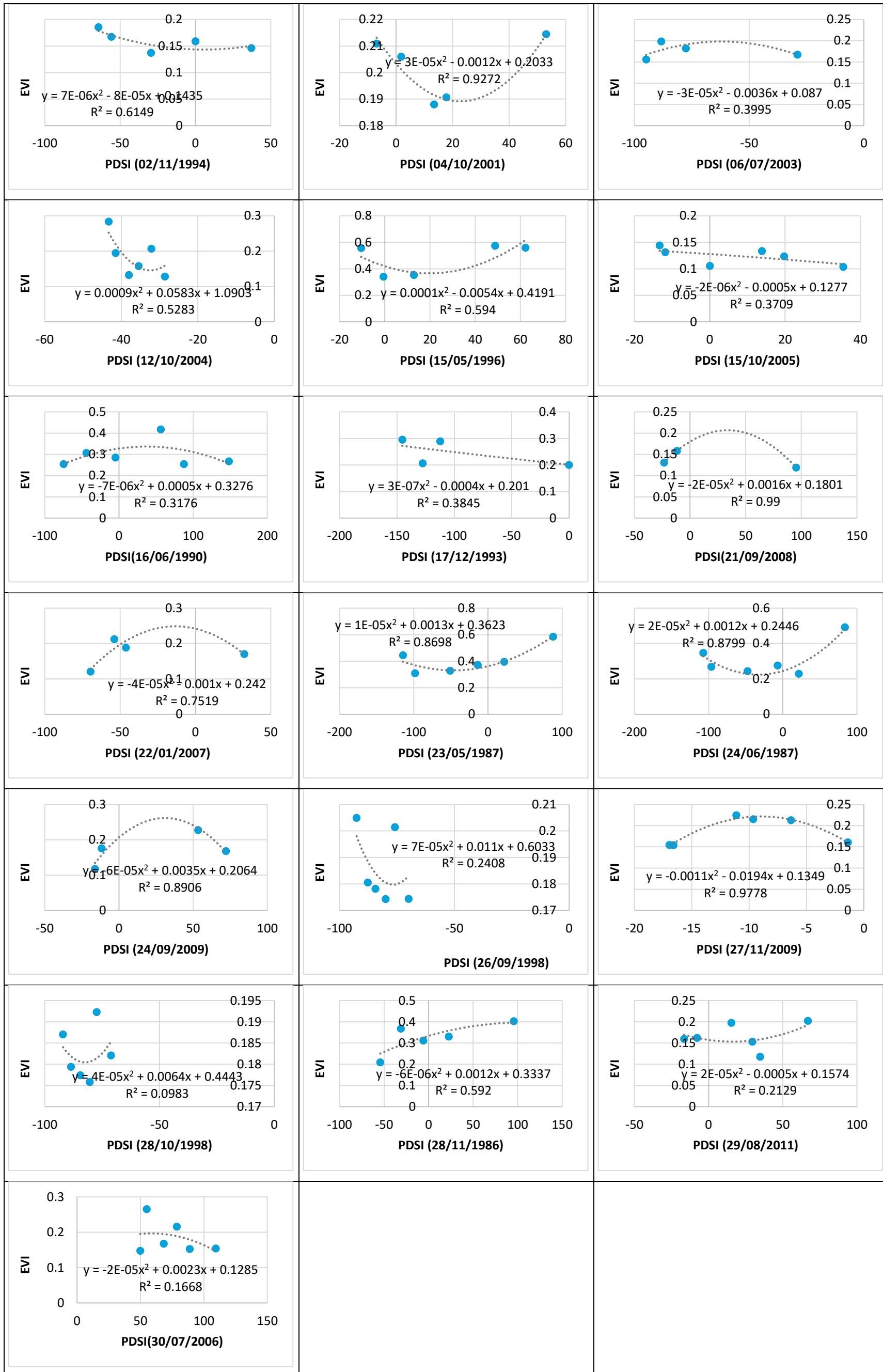


Tabela D.12 – Correlação pontual: PDSI x NDVI.

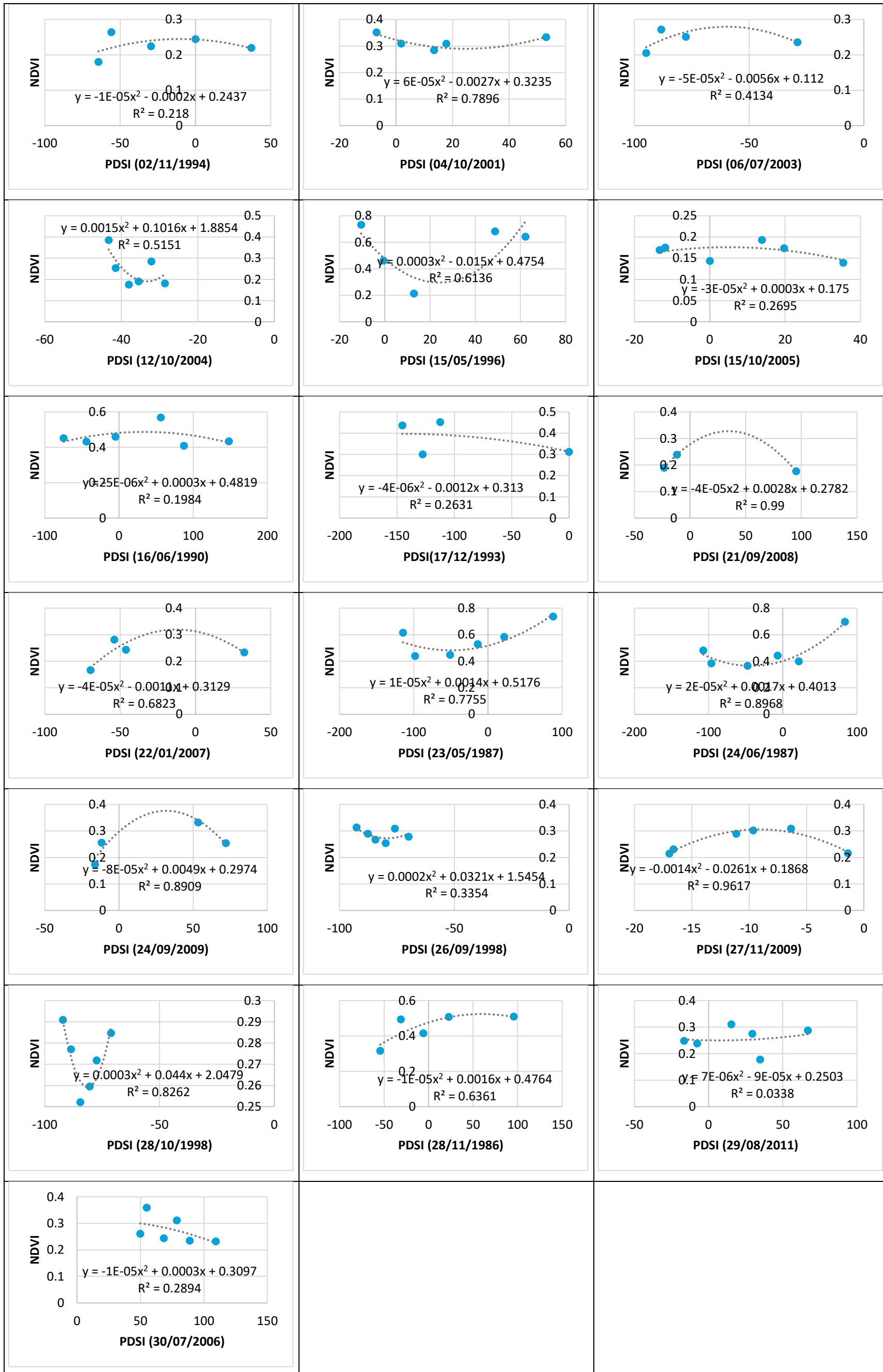


Tabela D.13 – Correlação pontual: PDSI x SAVI.

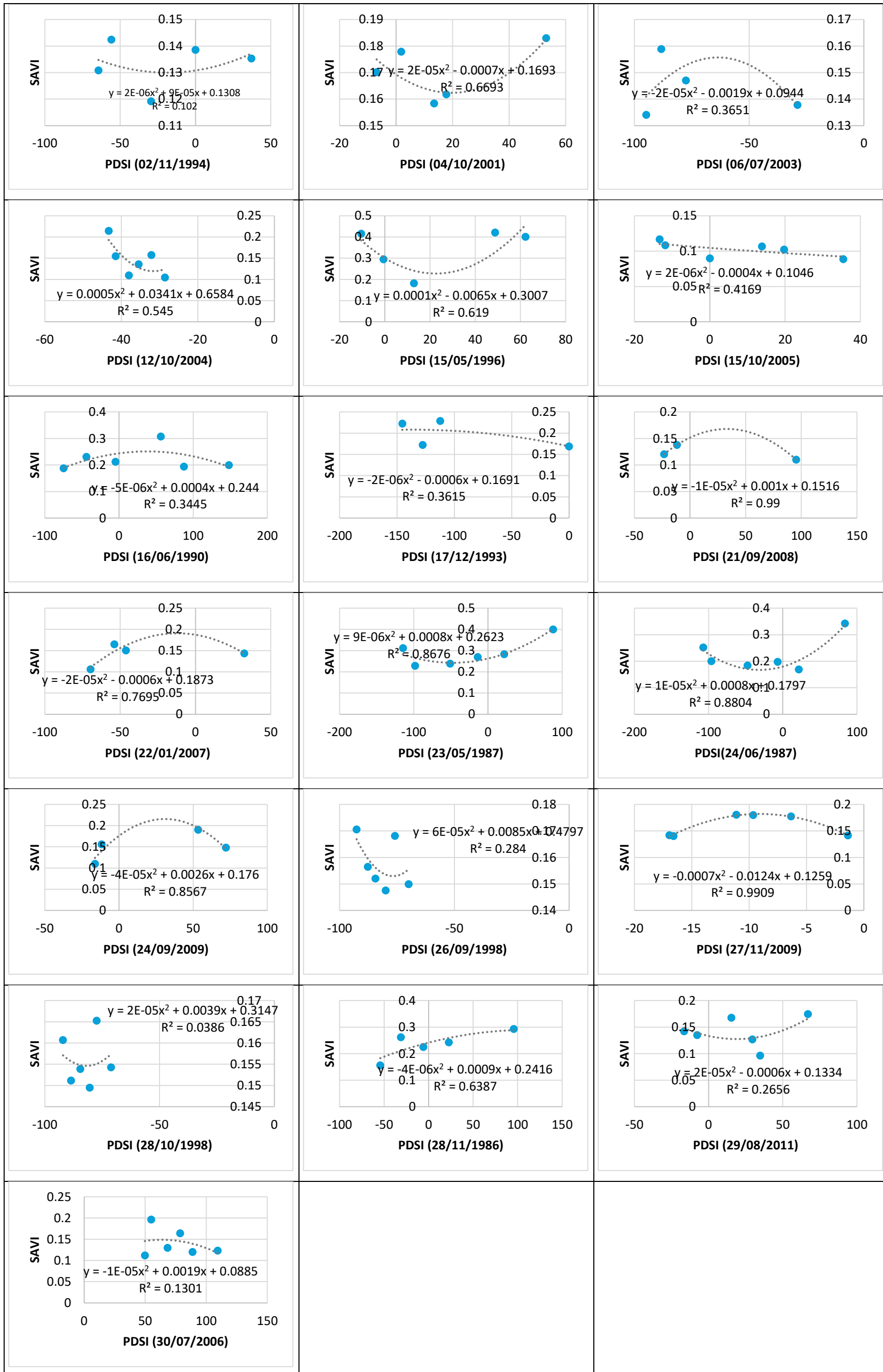


Tabela D.14 – Correlação pontual: PDSI x SVI.

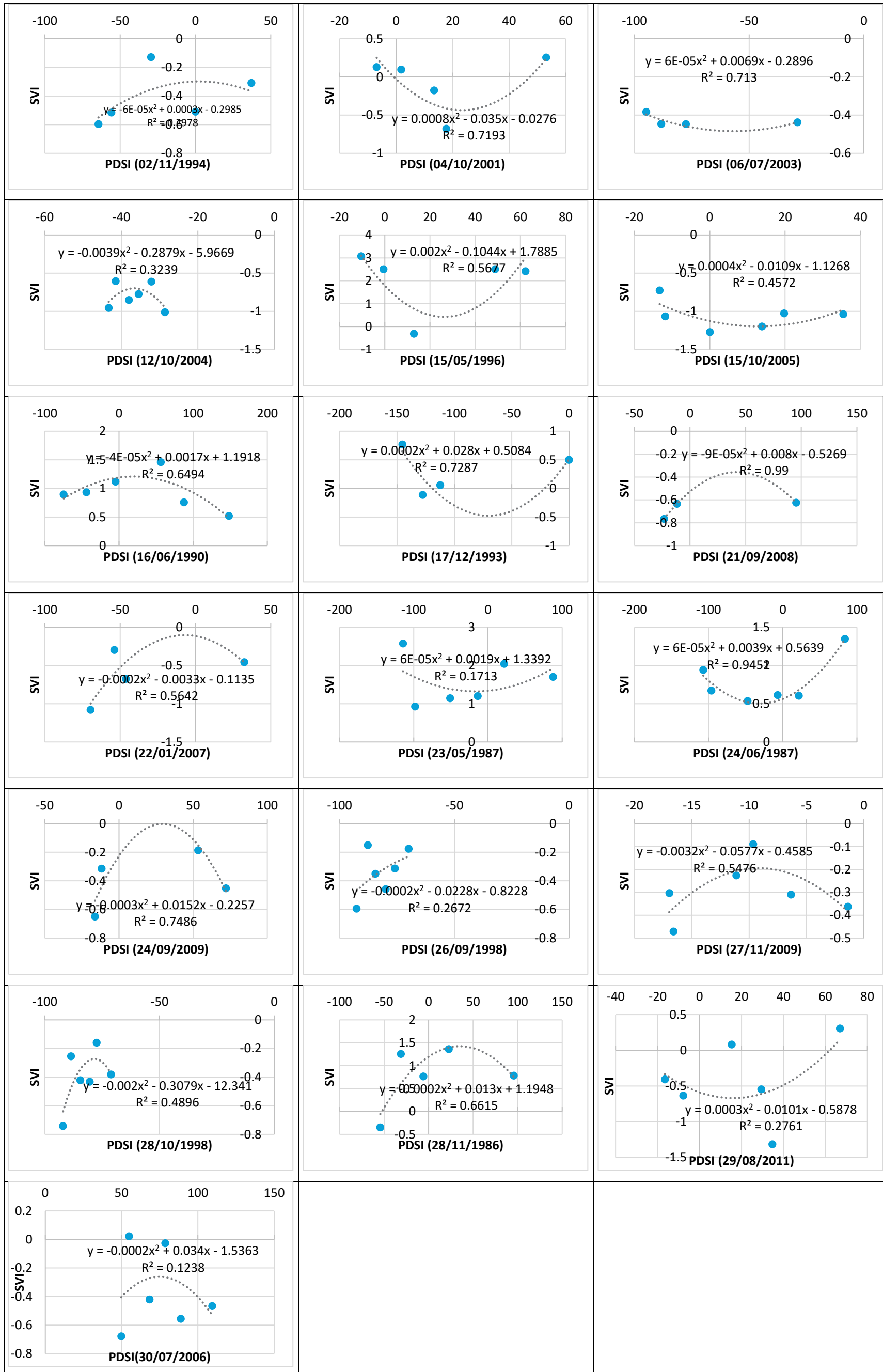


Tabela D.15 – Correlação pontual: PDSI x VCI.



APÊNDICE E – CORRELAÇÃO PONTUAL ENTRE OS ÍNDICES DE ARIDEZ X ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA BACIA DO RIO BRÍGIDA.

Tabela E.1 – Correlação pontual: MIA x EVI.

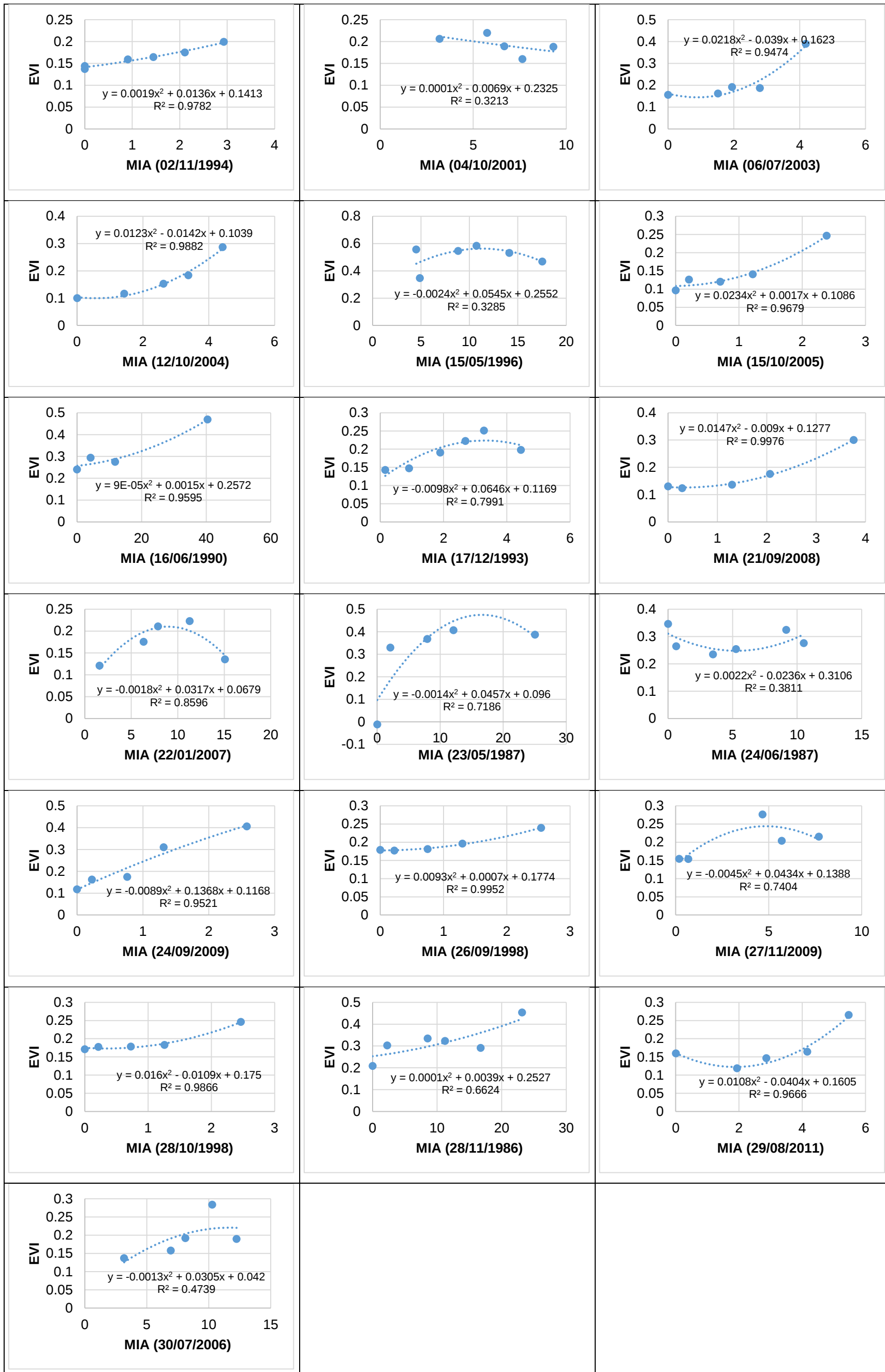


Tabela E.2 – Correlação pontual: MIA x NDVI.

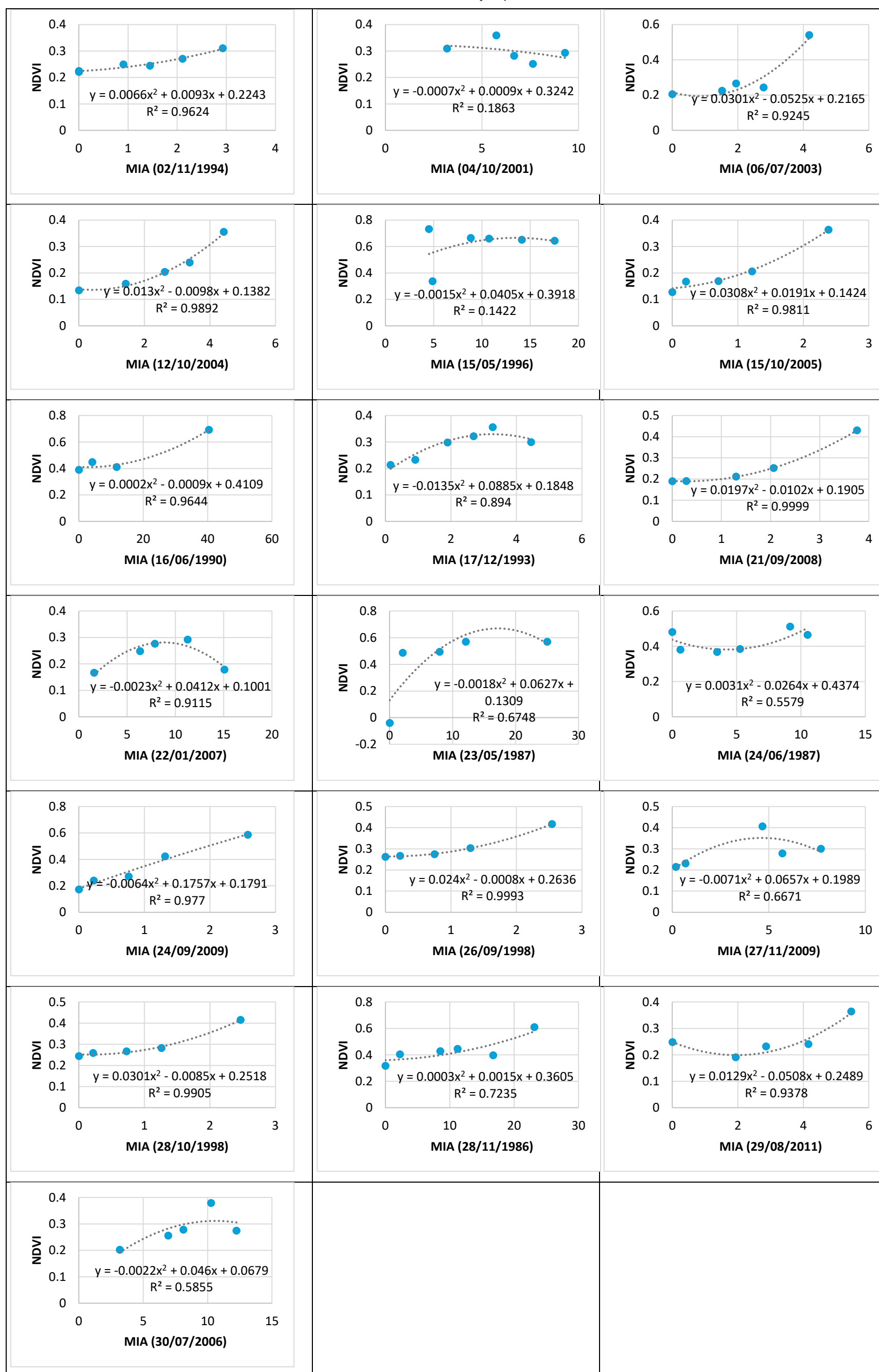


Tabela E.3 – Correlação pontual: MIA x SAVI.

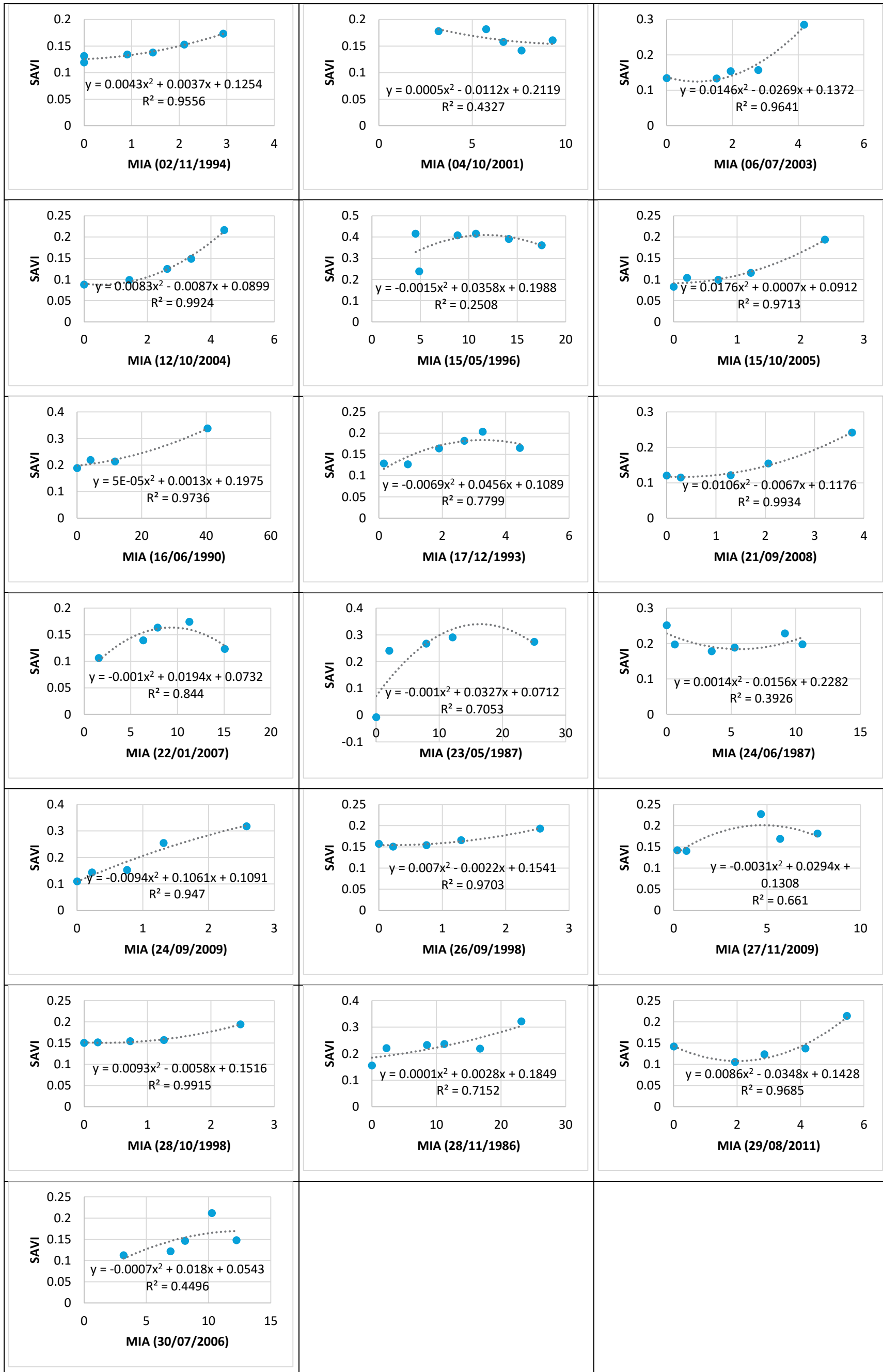


Tabela E.4 – Correlação pontual: MIA x SVI.

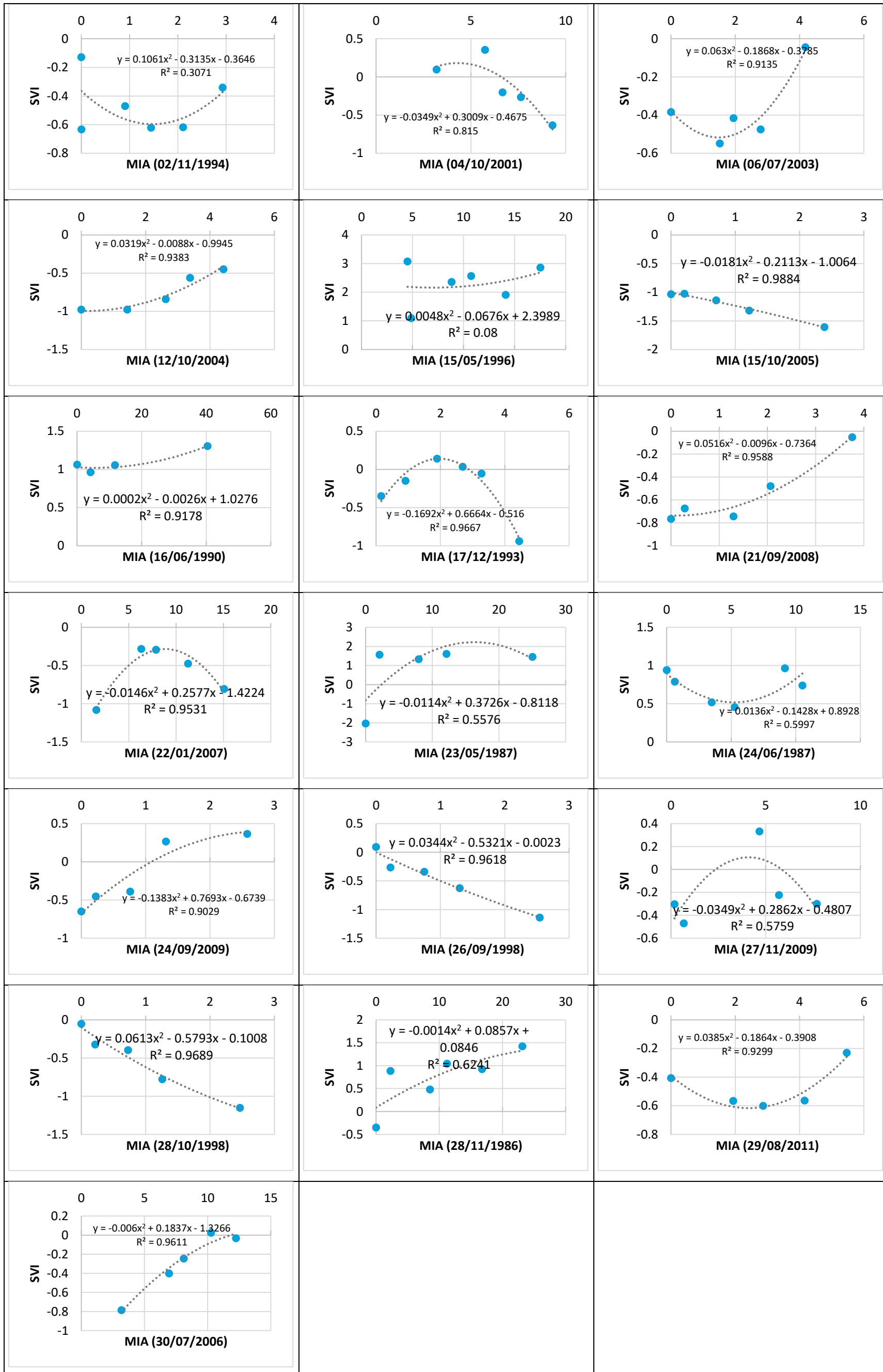


Tabela E.5 – Correlação pontual: MIA x VCI.

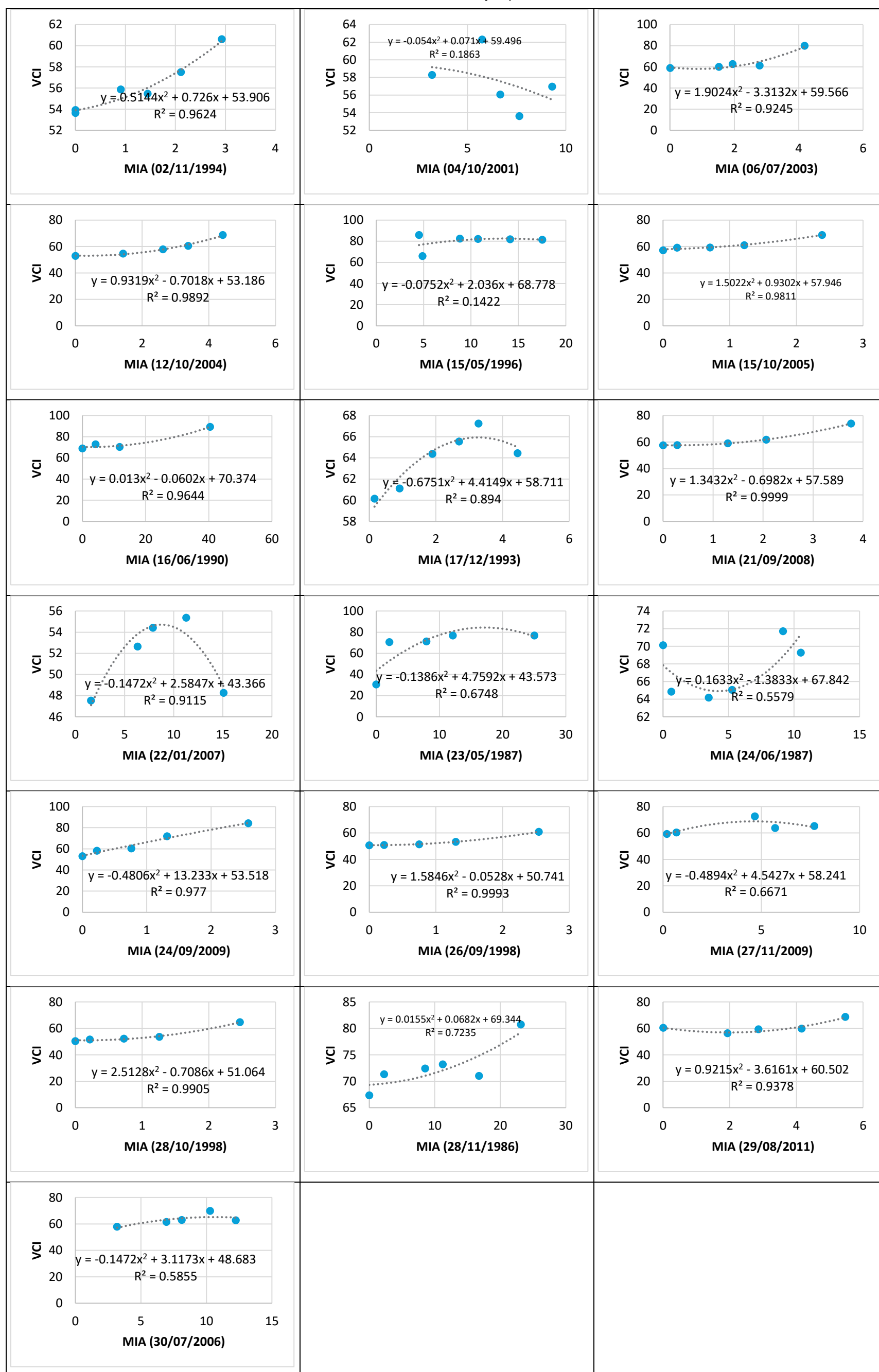


Tabela E.6 – Correlação pontual: AI x EVI.

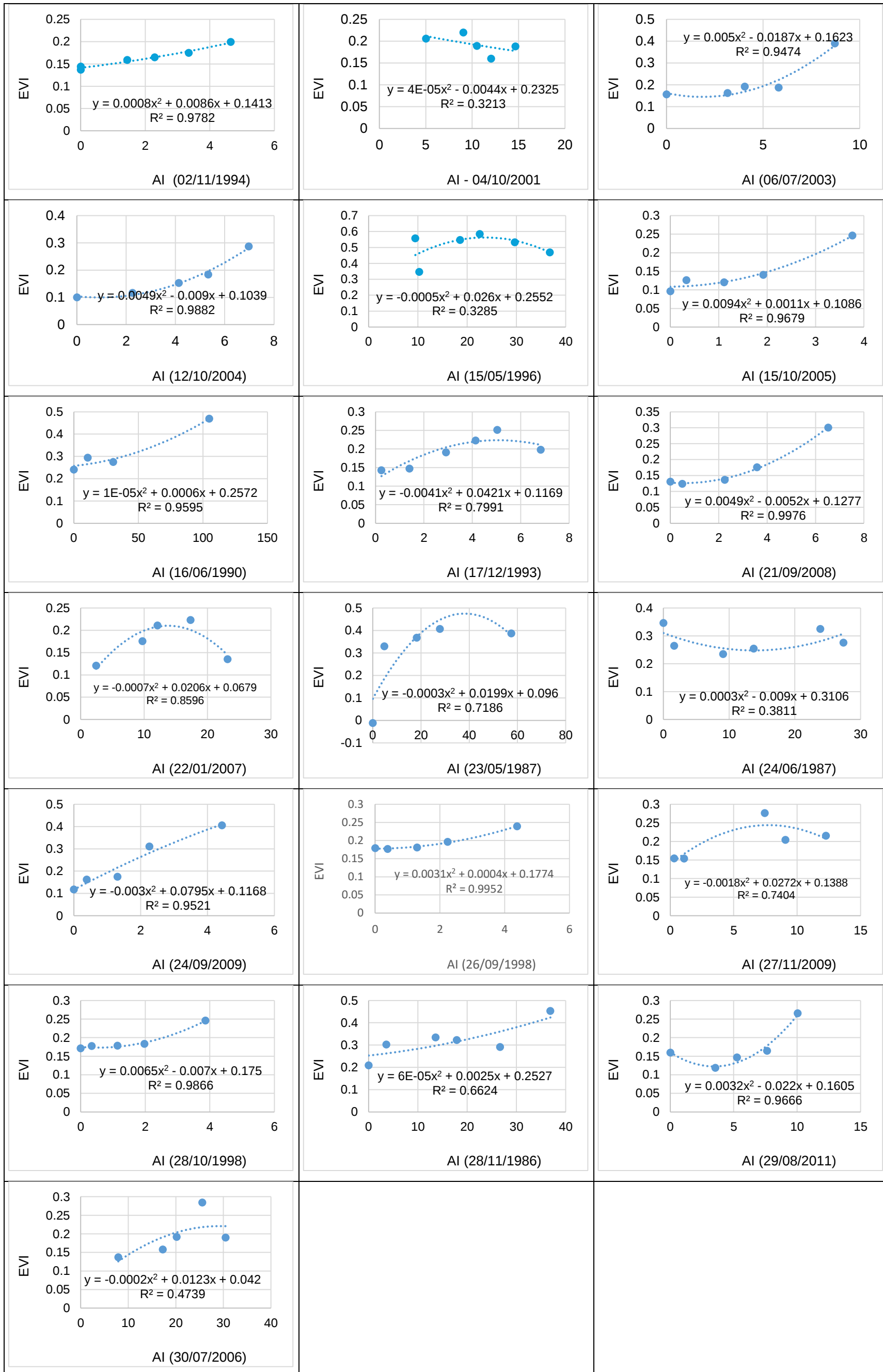


Tabela E.7 – Correlação pontual: AI x NDVI.

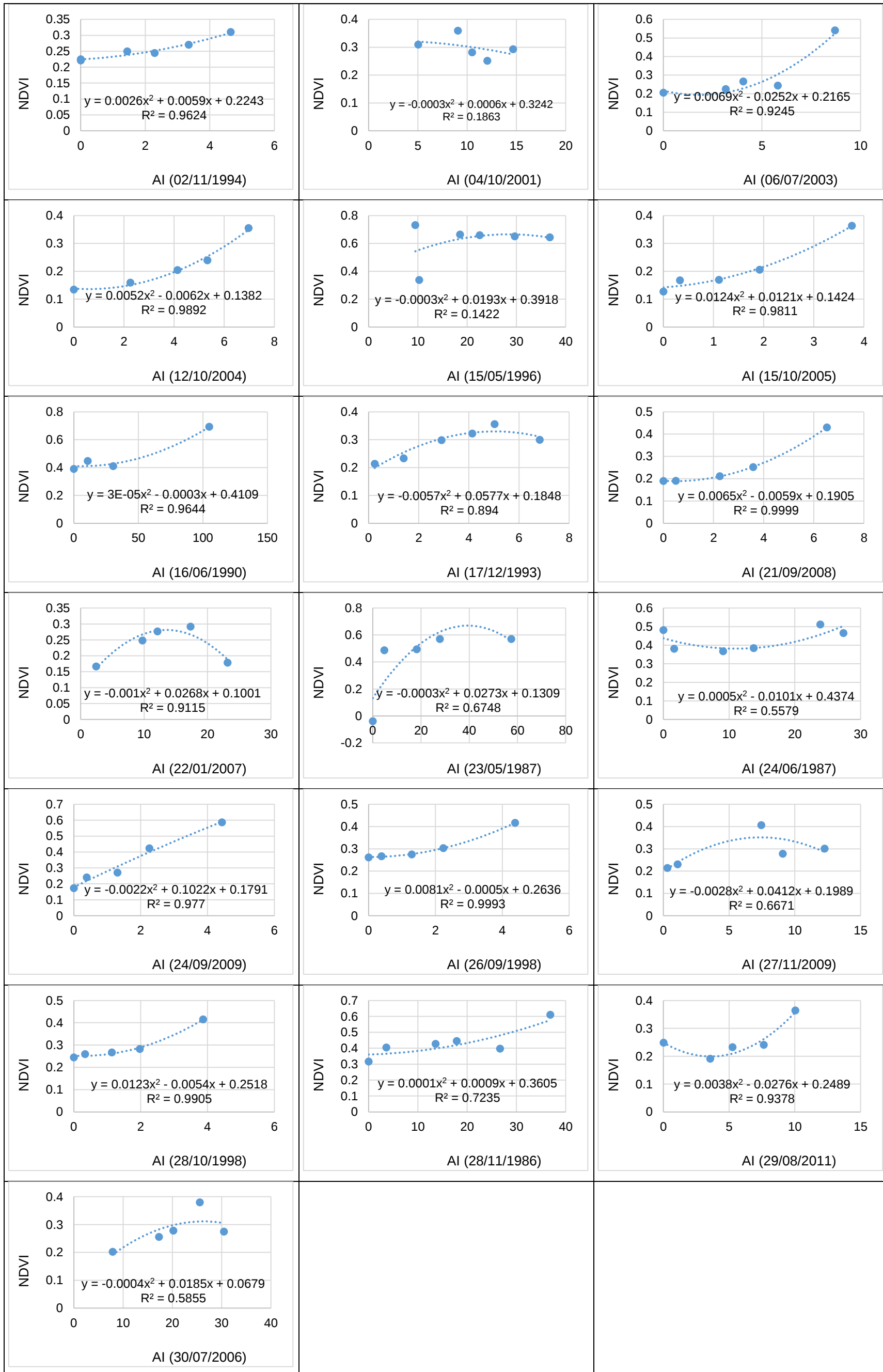


Tabela E.8 – Correlação pontual: AI x SAVI.

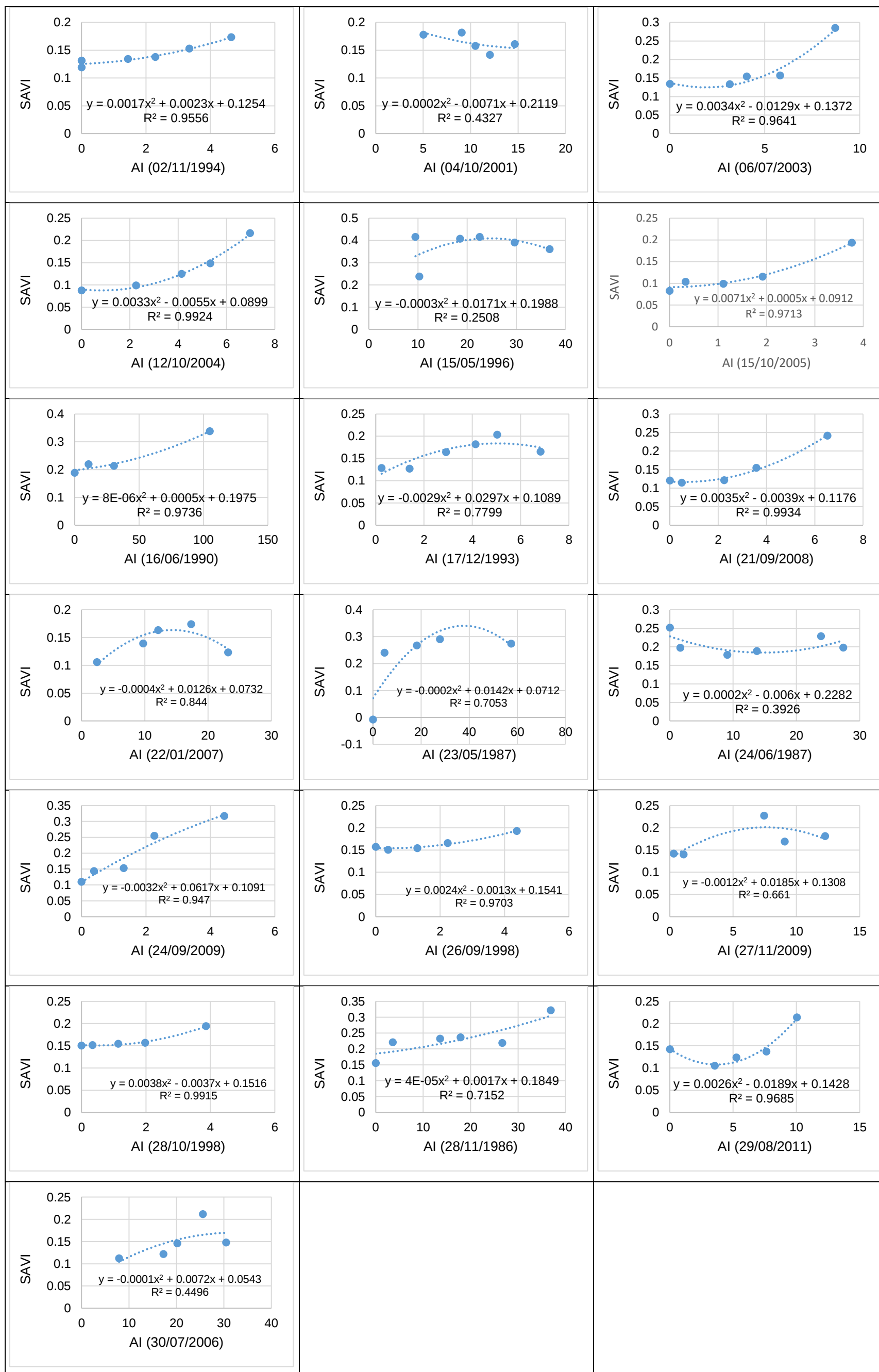


Tabela E.9 – Correlação pontual: AI x SVI.

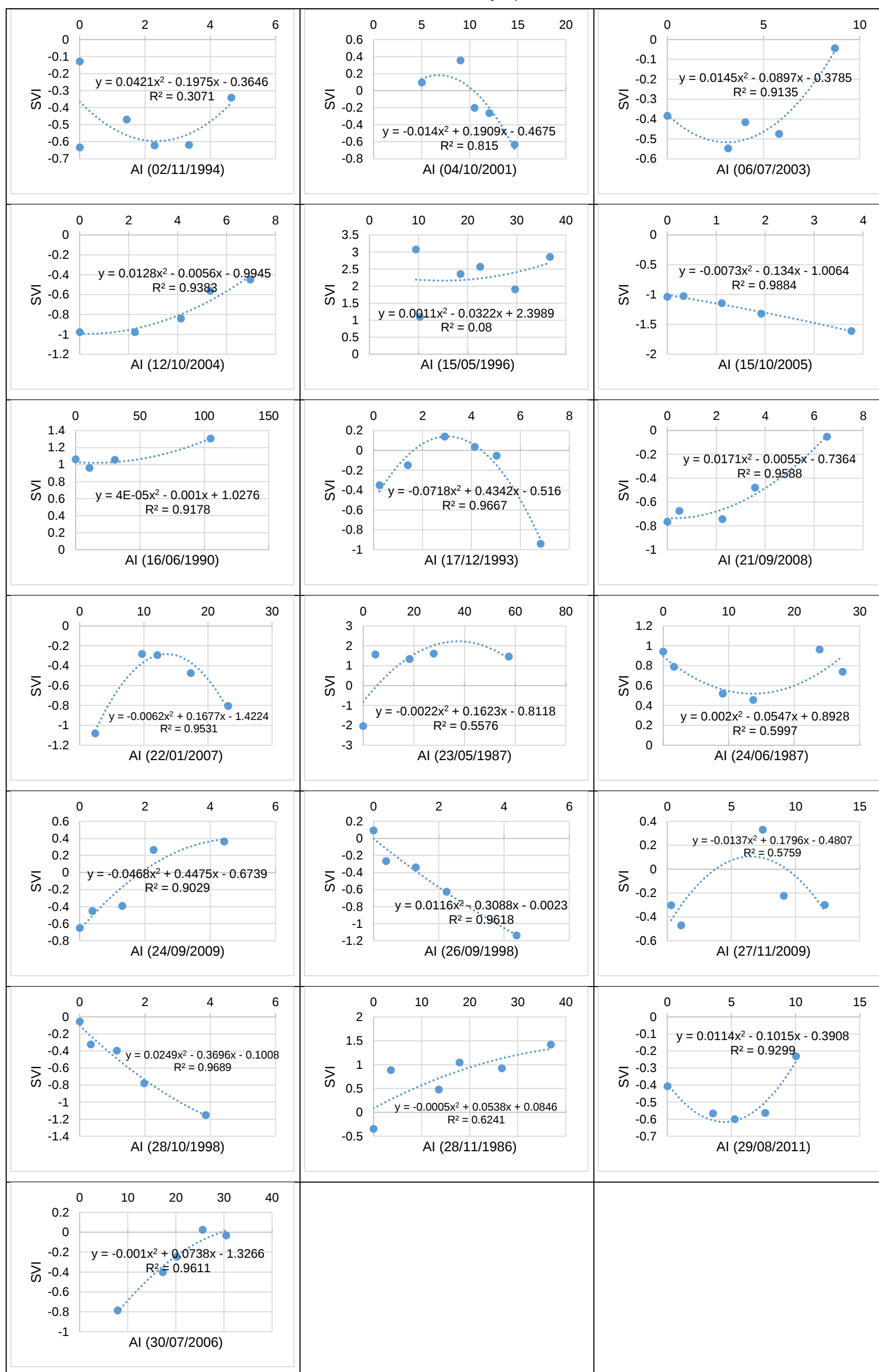


Tabela E.10 – Correlação pontual: AI x VCI.

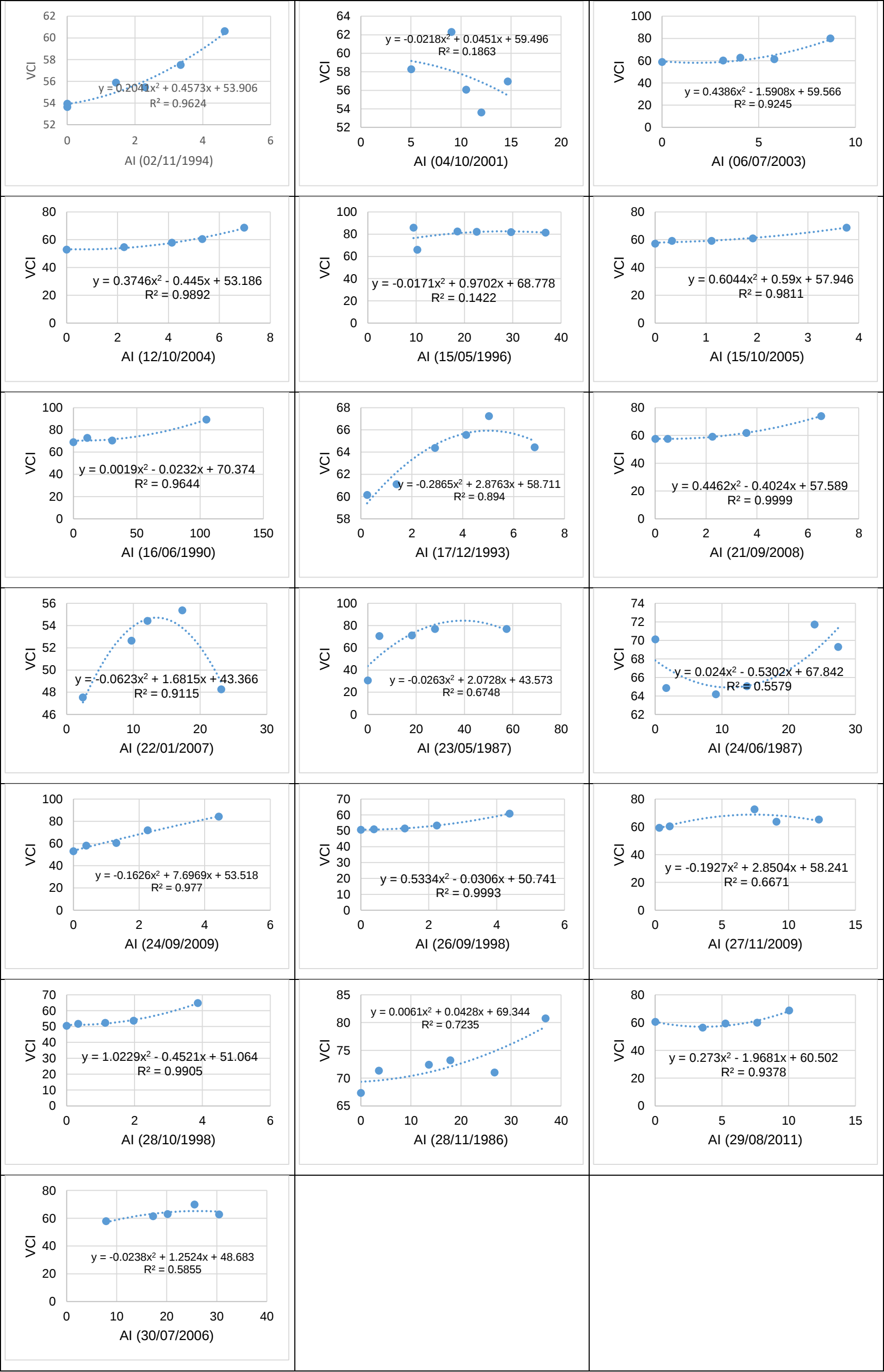


Tabela E.11 – Correlação pontual: AI_{ASD} X EVI.

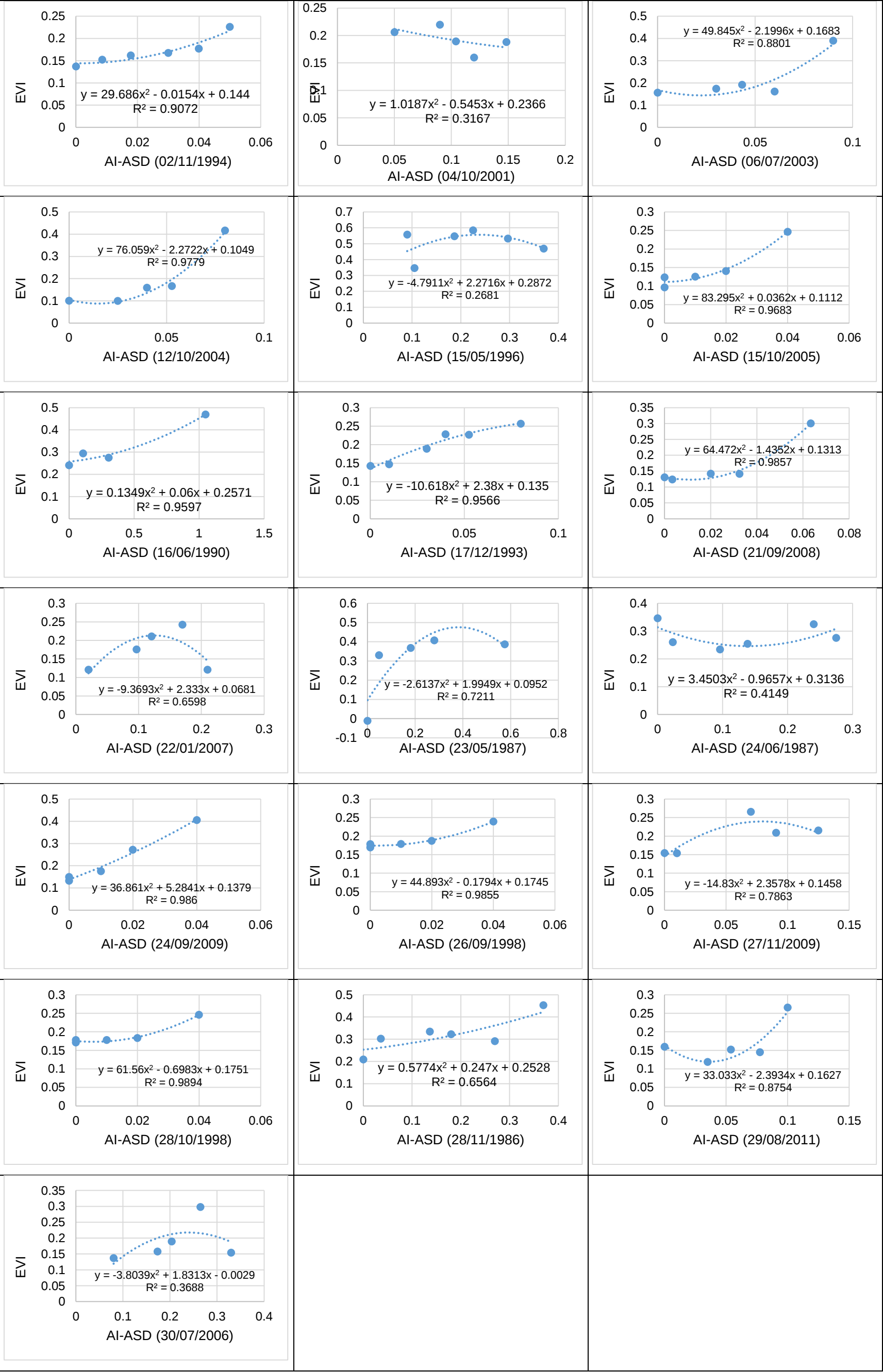


Tabela E.12 – Correlação pontual: AI_{ASD} x NDVI.

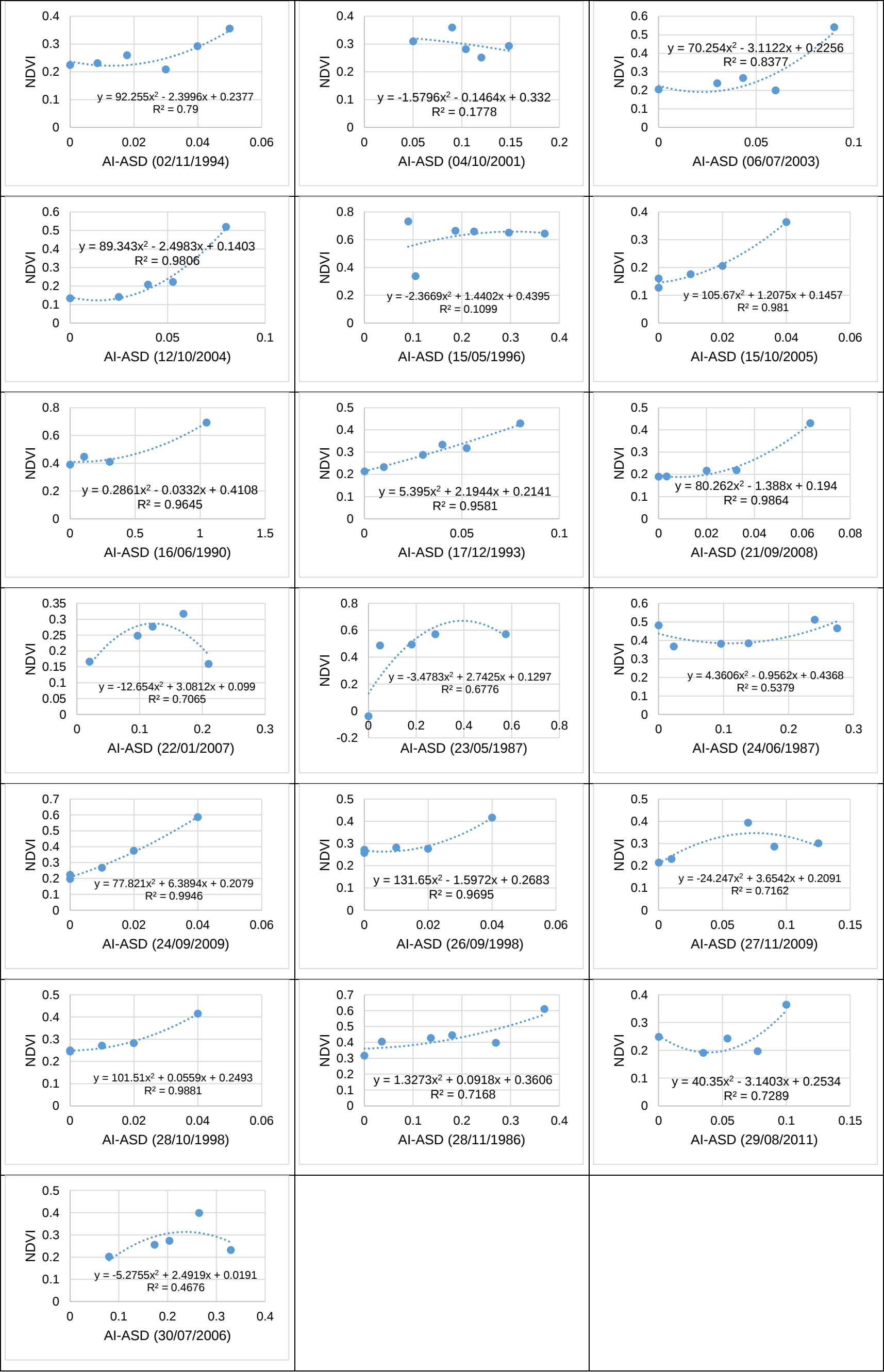


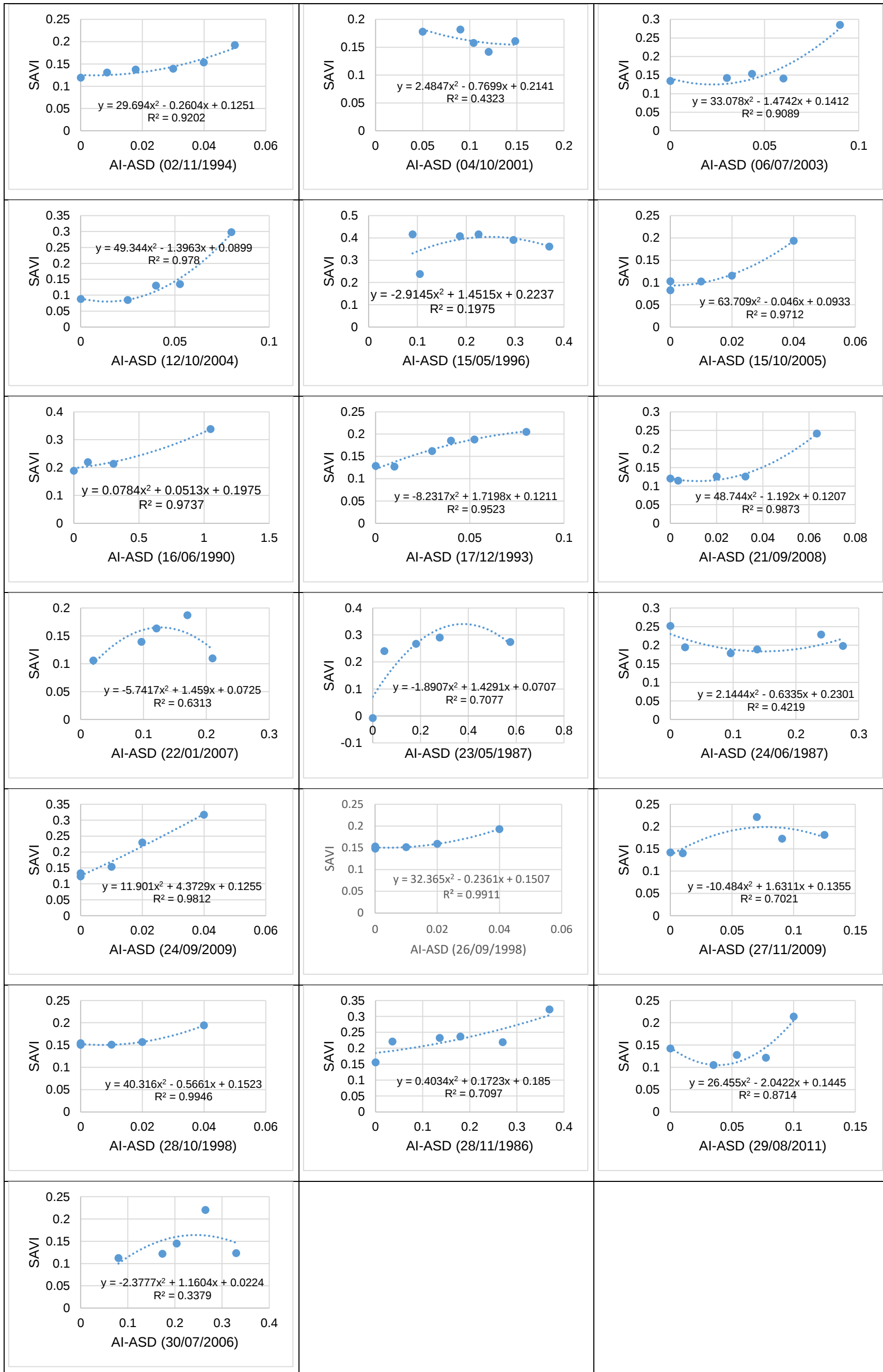
Tabela E.13 – Correlação pontual: AI_{ASD} x SAVI.

Tabela E.14 – Correlação pontual: AI_{ASD} X SVI.

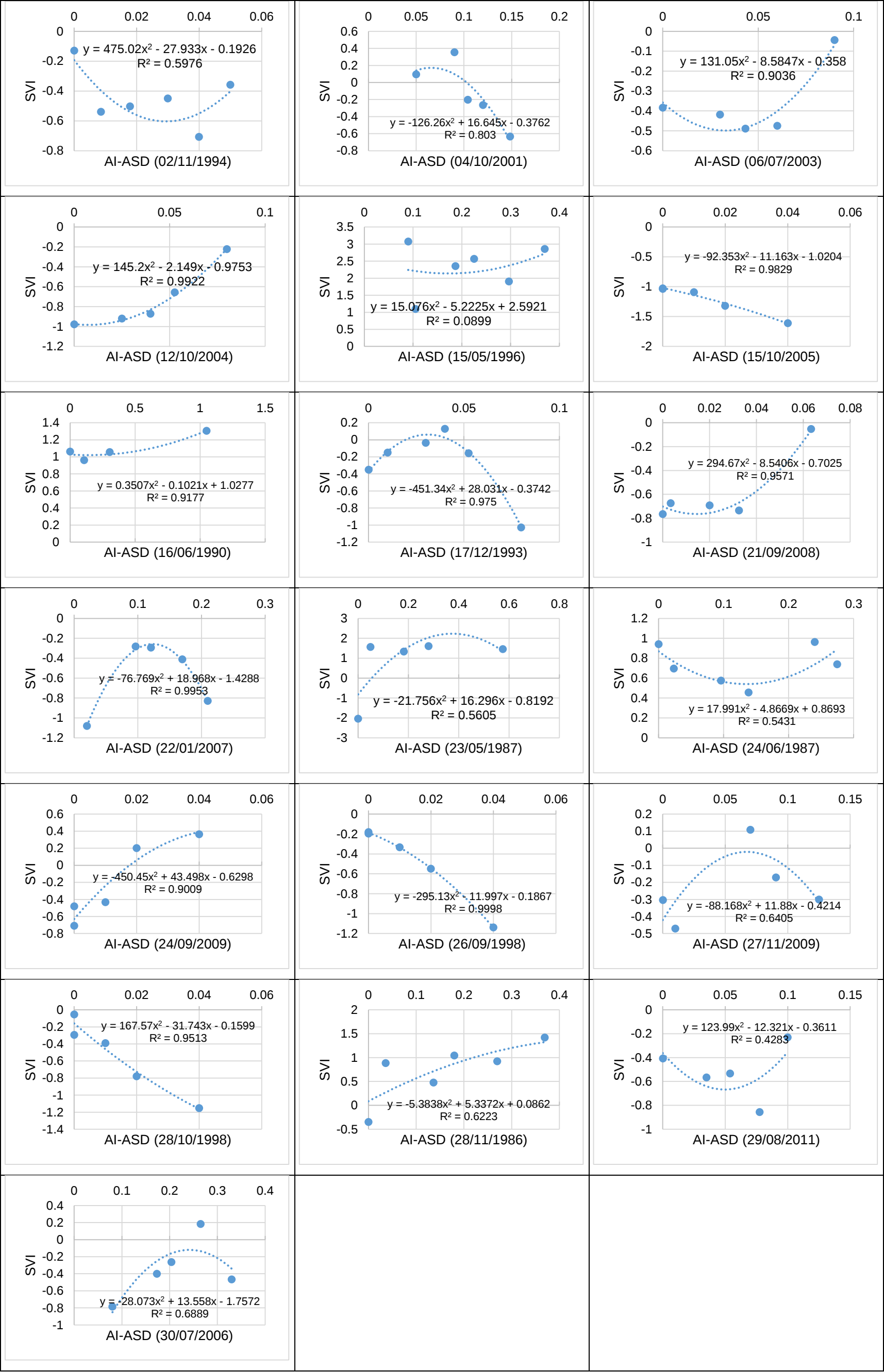


Tabela E.15 – Correlação pontual: AI_{ASD} x VCI.

