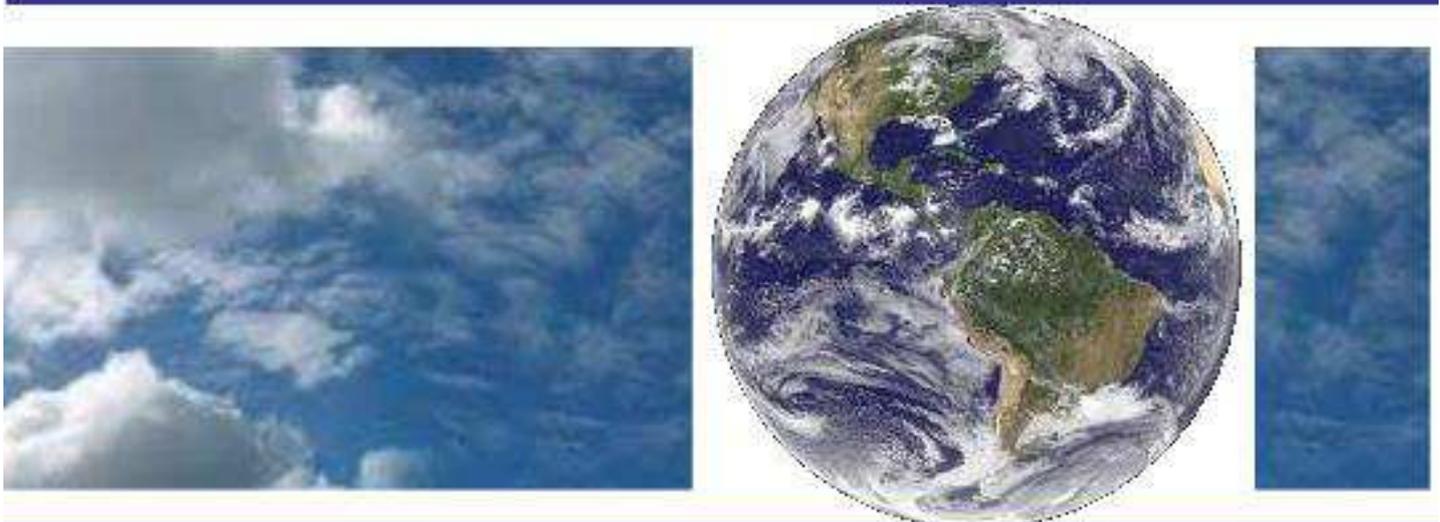


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

# **METEOROLOGIA**



## **TESE DE DOUTORADO**

**Leonardo Fagner Ponciano Barbieri**

**Mudanças Microclimáticas Induzidas por Alterações na  
Cobertura e Uso da Terra na Região do Submédio São  
Francisco**

**Campina Grande, março de 2021**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

**TESE DE DOUTORADO**

**MUDANÇAS MICROCLIMÁTICAS INDUZIDAS POR ALTERAÇÕES  
NA COBERTURA E USO DA TERRA NA REGIÃO DO SUBMÉDIO  
SÃO FRANCISCO**

Doutorando: Leonardo Fagner Ponciano Barbieri

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Magaly de Fatima Correia

Campina Grande – PB

Março/2021

**LEONARDO FAGNER PONCIANO BARBIERI**

**MUDANÇAS MICROCLIMÁTICAS INDUZIDAS POR ALTERAÇÕES  
NA COBERTURA E USO DA TERRA NA REGIÃO DO SUBMÉDIO  
SÃO FRANCISCO**

Tese de Doutorado submetida à  
Coordenação do Programa de Pós-  
Graduação em Meteorologia da  
Universidade Federal de Campina Grande  
em cumprimento às exigências para a  
obtenção do título de Doutor em  
Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Subárea: Sinótica-Dinâmica da Atmosfera Tropical

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Magaly de Fatima Correia

Campina Grande – PB

Março/2021

B236e

Barbieri, Leonardo Fagner Ponciano.

Mudanças microclimáticas induzidas por alterações na cobertura e uso da terra na região do submédio São Francisco / Leonardo Fagner Ponciano Barbieri. – Campina Grande, 2022.

89 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.

"Orientação: Profa. Dra. Magaly de Fatima Correia".

Referências.

1. Meteorologia de Meso e Grande Escalas. 2. Sinótica-dinâmica da Atmosfera Tropical. 3. Agricultura Irrigada. 4. Complexo Agroindustrial Juazeiro-Petrolina. 5. Teste de Tendência de Mann-Kendall. I. Correia, Magaly de Fatima. II. Título.

CDU 551.515.6(043)

LEONARDO FAGNER PONCIANO BARBIERI

MUDANÇAS MICROCLIMÁTICAS INDUZIDAS POR ALTERAÇÕES NA  
COBERTURA E USO DA TERRA NA REGIÃO DO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO

TESE APROVADA EM 15/03/2021

BANCA EXAMINADORA



Prof.ª. Dra. MAGALY DE FATIMA CORREIA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof.ª. Dra. MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. THIERES GEORGE FREIRE DA SILVA  
Unidade Acadêmica de Serra Talhada  
Universidade Federal Rural de Pernambuco



Prof.ª. Dra. ALDINETE BEZERRA BERRETO  
Unidade Acadêmica de Tecnologia do Desenvolvimento  
Universidade Federal de Campina Grande

*“Estamos existindo entre mistérios e silêncios  
Evoluindo a cada dia, a cada Sol  
Se era certo, ou se errei  
Se sou súdito, se sou Rei  
Somente atento à voz do tempo, saberei.”*

(Dani Black; Maior, 2015)

## AGRADECIMENTOS

Após esses quatro anos no Doutorado, nos quais eu experimentei os mais diversos sentimentos e sensações, que transitaram desde as mais profundas angústias e decepções até a mais forte fé e esperança de que tudo daria certo no final, tenho inúmeras razões e pessoas para agradecer.

Primeiramente, como não poderia deixar de ser, agradeço a Deus e a toda comunidade espiritual, que me acompanham e me inspiram desde sempre a tomar as melhores decisões para o meu crescimento como pessoa e como espírito. Esse suporte foi, é e sempre será de fundamental importância em minha vida.

À minha tão amada mãe, Teresinha, que esteve tão presente e rezando sempre por mim, muitas vezes sem saber em detalhes pelo que eu estava passando, mas sempre fazendo tudo o que estava a seu alcance para me ajudar. Ela assumiu o compromisso de me ter como filho nesta vida e tem cumprido esse papel com excelência.

À minha família, que me deu toda a base moral para ser quem eu sou hoje e que vibra com cada vitória alcançada. Especialmente ao meu avô, Manuel, que mesmo não estando mais fisicamente entre nós, se fez presente em todos os momentos, me aconselhando e me dando tanto carinho e amor, através de nossos encontros nos sonhos. Minha avó, Nina, tão emotiva e sempre alegre ao me encontrar e saber que eu estou por perto. Meu tio João (Dão), que acendeu o desejo em mim de cursar Meteorologia. Minhas tias Neuma e Inês, pelas conversas e pelo carinho que sempre tive em todos os momentos. Todos os demais familiares, que direta ou indiretamente fizeram parte desse meu longo caminho.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Magaly de Fatima Correia, por tantos anos de parceria, de paciência, de amizade e cuidado. Jamais conseguirei retribuir todo o bem que me fez até hoje. Tenho certeza que ela sente, muito mais do que sabe, do sentimento sincero que tenho por ela, o respeito como aluno, como uma espécie de filho que me sinto. Gratidão eterna!

Aos demais professores da UFCG, que fizeram parte da minha história, desde a graduação até aqui, principalmente os do curso de Meteorologia, com quem eu tive um maior contato e pelos quais tenho um sentimento muito bonito de respeito e de admiração.

Aos membros da banca avaliadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Regina da Silva Aragão, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Aldinete Bezerra Barreto, Prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti e o Prof. Dr. Thieres George

Freire da Silva pelas valiosas sugestões no texto, que fizeram com que o trabalho melhorasse consideravelmente.

Aos meus amigos dessa jornada desde os tempos de graduação, iniciada treze anos atrás. Jaqueline Queiroz, mais de dez anos de amizade, rindo junto, sofrendo junto, torcendo um pelo outro sempre. Quero levar sempre comigo essa amizade que só me faz bem. Amo mais que tudo. Rafaella Vilar, sem palavras para definir essa amizade que se formou de forma inesperada e que hoje não consigo viver sem mais. Julliana, a primeira amizade conquistada no curso de Meteorologia, até hoje comigo. E a lista só cresce: Leydson, Gabriella, Mila, Adriana, Milena, muito feliz por ter convivido com todas essas pessoas. Levarei para sempre comigo!

Agradecimento especial ao meu amigo Felipe que, como poucos soube muito de todo o processo desses últimos quatro anos e que participou de muitas decisões que me fizeram chegar onde me encontro hoje.

Além desses, não tenho como deixar de fora o trio de amigos que conheci em Barra do Garças-MT, em 2019, durante minha breve passagem pela Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), Bruno, Nágila e Victor. Estávamos juntos, até o último instante em que a pandemia da COVID-19 permitiu. Valeu a pena cada momento, todos os risos, abraços e farras!

Por fim, mas longe de ser menos importante, um agradecimento cheio de carinho e afeto a José Anchieta que, principalmente nesses dois últimos anos de Doutorado, estive muito próximo e me auxiliou com seus conselhos, incentivo e energia positiva, me lembrando sempre que eu era capaz e que conseguiria vencer essa batalha.

Enfim, estou chegando ao fim de mais um ciclo em minha vida, apresentando minha Tese de Doutorado, que me tomou tantas noites de sono, mas que me proporcionou tanto aprendizado, conhecimentos e descobertas. Não a Tese em si, mas a experiência do Doutorado me abriu uma janela para um mundo que eu jamais poderia imaginar conhecer. Não o fim deste processo em si, com a defesa e entrega do texto final, mas a conquista de mais esse título para a minha carreira me faz perceber que papéis são só papéis e que titulações podem até falar sobre nós, mas não dizem tudo. Não a pesquisa em si, mas o conhecimento me ajudou, ainda mais, a entender como o parcelamento das ciências também é uma forma de dominação de consciência. Não o título, mas por estar bem próximo de me tornar o Dr. Leonardo, agora eu entendo o quanto essa palavrinha é usada como forma de reivindicar autoridade, quando, na verdade, tudo o que deveríamos buscar era viver para a felicidade.

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul

ATD – Amplitude Térmica Diária

BDMEP – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa

BNB – Banco do Nordeste do Brasil

CAI – Complexo Agroindustrial

CHESF – Companhia Hidrelétrica do Vale do São Francisco

CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco

CPATSA – Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido

CVSF – Comissão do Vale do São Francisco

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra a Seca

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FAO – Food and Agriculture Organization

GTDN – Grupo de Trabalho para o Desenvolvimento do Nordeste

ICU – Ilha de Calor Urbana

IFOCS – Inspetoria Federal de Obras Contra a Seca

II PND – II Plano Nacional de Desenvolvimento

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IVDN – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

NEB – Nordeste brasileiro

OMM – Organização Meteorológica Mundial

SF – Sistema Frontal

SUDENE – Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste

SUVALE – Superintendência do Vale do São Francisco

VCAN – Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

## LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

$\alpha$  – alfa

$\cong$  – aproximadamente

$R^2$  – correlação de Pearson

g/kg – grama por quilograma

$^{\circ}\text{C}$  – grau Celcius

$>$  – maior que

$<$  – menor que

$\leq$  – menor ou igual

mb – milibar

mm – milímetros

% – porcentagem

km/dia – quilômetros por dia

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 4.1</b> – Nordeste brasileiro, com destaque para as sub-regiões do baixo, submédio e parte do médio da BHSF, localização geográfica do lago de Sobradinho e das estações climatológicas .....	<b>22</b>
<b>Figura 4.2</b> – Esquema básico de um <i>boxplot</i> , com a presença de um <i>outlier</i> e do valor médio .....	<b>26</b>
<b>Figura 5.1</b> – Médias climatológicas (1975 a 2014): (a) precipitação; (b) razão de mistura; (c) vento; (d) ATD; (e) temperatura máxima e (f) temperatura mínima em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE .....	<b>36</b>
<b>Figura 5.2</b> – <i>Boxplot</i> da precipitação anual (mm): (a) Bebedouro-PE; (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.....	<b>39</b>
<b>Figura 5.3</b> – <i>Boxplot</i> da razão de mistura anual (g/kg): (a) Bebedouro-PE; (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE .....	<b>42</b>
<b>Figura 5.4</b> – <i>Boxplot</i> do vento anual (km/dia) a 10 m em Petrolina-PE .....	<b>43</b>
<b>Figura 5.5</b> – <i>Boxplot</i> da ATD anual (°C): (a) Bebedouro-PE; (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE .....	<b>44</b>
<b>Figura 5.6</b> – <i>Boxplot</i> da temperatura máxima do ar anual (°C): (a) Bebedouro-PE; (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE .....	<b>46</b>
<b>Figura 5.7</b> – <i>Boxplot</i> da temperatura mínima do ar anual (°C): (a) Bebedouro-PE; (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE .....	<b>47</b>
<b>Figura 5.8</b> – Imagens classificadas da área em estudo, demonstrando a dinâmica da ocupação das áreas irrigadas nos dias: (a) 24/06/1987; (b) 17/08/1995; (c) 24/09/2003 e (d) 29/08/2011 .....	<b>50</b>
<b>Figura 5.9</b> – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries anuais da precipitação (mm) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE .....	<b>61</b>
<b>Figura 5.10</b> – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período chuvoso da precipitação (mm) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE .....	<b>62</b>

<b>Figura 5.11</b> – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período seco da precipitação (mm) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE .....	<b>63</b>
<b>Figura 5.12</b> – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries anuais da razão de mistura (g/kg) de: (a) Bebedouro-PE e (b) Petrolina-PE .....	<b>64</b>
<b>Figura 5.13</b> – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período chuvoso da razão de mistura (g/kg) de: (a) Bebedouro-PE e (b) Mandacaru-BA .....	<b>65</b>
<b>Figura 5.14</b> – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período seco da razão de mistura (g/kg) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE .....	<b>66</b>
<b>Figura 5.15</b> – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt do vento (km/dia) em Petrolina-PE para as séries: (a) anual, (b) período chuvoso e (c) período seco .....	<b>66</b>
<b>Figura 5.16</b> – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries anuais da ATD (°C) de: (a) Bebedouro-PE e (b) Petrolina-PE .....	<b>67</b>
<b>Figura 5.17</b> – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período chuvoso da ATD (°C) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE .....	<b>68</b>
<b>Figura 5.18</b> – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período seco da ATD (°C) de: (a) Bebedouro-PE e (b) Petrolina-PE .....	<b>69</b>
<b>Figura 5.19</b> – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries anuais da temperatura máxima do ar (°C) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE .....	<b>70</b>
<b>Figura 5.20</b> – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período chuvoso da temperatura máxima do ar (°C) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE .....	<b>71</b>
<b>Figura 5.21</b> – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período seco da temperatura máxima do ar (°C) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE .....	<b>72</b>
<b>Figura 5.22</b> – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries anuais da temperatura mínima do ar (°C) de: (a) Mandacaru-BA e (b) Petrolina-PE .....	<b>73</b>

**Figura 5.23** – Gráfico do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para a série do período chuvoso da temperatura mínima do ar (°C) de Mandacaru-BA ..... **73**

**Figura 5.24** – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período seco da temperatura mínima do ar (°C) de: (a) Bebedouro-PE e (b) Petrolina-PE .... **74**

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 5.1</b> – Crescimento populacional das cidades de Petrolina-PE e Juazeiro-BA .....	<b>49</b>
<b>Tabela 5.2</b> – Área equipada para irrigação na Região Nordeste .....	<b>51</b>
<b>Tabela 5.3</b> – Análise de regressão aplicada à precipitação (mm) em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE .....	<b>53</b>
<b>Tabela 5.4</b> – Análise de regressão aplicada à razão de mistura (g/kg) em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE .....	<b>54</b>
<b>Tabela 5.5</b> – Análise de regressão aplicada ao vento (km/dia) em Petrolina-PE .....	<b>55</b>
<b>Tabela 5.6</b> – Análise de regressão aplicada à ATD (°C) em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE .....	<b>56</b>
<b>Tabela 5.7</b> – Análise de regressão aplicada à temperatura máxima do ar (°C) em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE .....	<b>57</b>
<b>Tabela 5.8</b> – Análise de regressão aplicada à temperatura mínima do ar (°C) em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE .....	<b>58</b>
<b>Tabela 5.9</b> – Resultado da ANOVA aplicada às séries temporais de Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE .....	<b>76</b>

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 5.1</b> – Resumo da Análise de Regressão aplicada às séries temporais de Bebedouro-PE (B), Mandacaru-BA (M) e Petrolina-PE (P).....	<b>59</b>
<b>Quadro 5.2</b> – Resultados estatísticos do teste Run para as séries temporais de Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE .....	<b>60</b>
<b>Quadro 5.3</b> – Resumo da ANOVA para as séries temporais de Bebedouro-PE (B), Mandacaru-BA (M) e Petrolina-PE (P) .....	<b>78</b>

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b> .....	<b>i</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES</b> .....	<b>ii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>iii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	<b>vii</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>6</b>
<b>1 – INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
<b>1.1 – Objetivo Geral</b> .....	<b>8</b>
<b>1.2 – Objetivos Específicos</b> .....	<b>8</b>
<b>2 – HISTÓRICO DA FORMAÇÃO DO COMPLEXO AGROINDUSTRIAL JUAZEIRO-PETROLINA</b> .....	<b>9</b>
<b>3 – REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>14</b>
<b>4 – DADOS E METODOLOGIA</b> .....	<b>22</b>
<b>4.1 – Área de Estudo</b> .....	<b>22</b>
<b>4.2 – Dados</b> .....	<b>23</b>
<b>4.3 – Metodologia</b> .....	<b>24</b>
<b>4.3.1 – Cálculo de Variáveis Derivadas</b> .....	<b>24</b>
<b>4.3.1.1 – Razão de Mistura</b> .....	<b>24</b>
<b>4.3.1.2 – Amplitude Térmica Diária (ATD)</b> .....	<b>24</b>
<b>4.3.1.3 – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada</b> .....	<b>24</b>
<b>4.3.2 – <i>Boxplot</i></b> .....	<b>25</b>
<b>4.3.3 – Preenchimento de Falhas por Imputação Múltipla</b> .....	<b>27</b>
<b>4.3.4 – Regressão Linear</b> .....	<b>28</b>
<b>4.3.5 – Teste Run</b> .....	<b>29</b>
<b>4.3.6 – Teste Sequencial de Mann-Kendall</b> .....	<b>31</b>

4.3.7 – Teste de Pettitt .....	32
4.3.8 – Análise de Variância (ANOVA).....	33
<b>5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>35</b>
5.1 – Médias Climatológicas .....	35
5.2 – Análise Estatística Exploratória com o Uso do Boxplot .....	38
5.2.1 – Precipitação .....	38
5.2.2 – Razão de Mistura (g/kg) .....	41
5.2.3 – Vento .....	43
5.2.4 – Amplitude Térmica Diária, Temperatura Máxima e Temperatura Mínima .....	44
5.2.4.1 – Amplitude Térmica Diária.....	44
5.2.4.2 – Temperatura Máxima e Temperatura Mínima.....	46
5.3 – Sensoriamento Remoto.....	49
5.4 – Análise Estatística .....	52
5.4.1 – Análise de Regressão.....	52
5.4.1.1 – Precipitação .....	52
5.4.1.2 – Razão de Mistura (g/kg) .....	53
5.4.1.3 – Vento .....	54
5.4.1.4 – Amplitude Térmica Diária (ATD).....	55
5.4.1.5 – Temperatura Máxima do Ar .....	56
5.4.1.6 – Temperatura Mínima do Ar.....	57
5.4.1.7 – Síntese dos Resultados .....	58
5.5 – Testes Não-Paramétricos: Teste Run, Teste Sequencial de Mann-Kendall (SMK) e Teste de Pettitt .....	59
5.5.1 – Teste Run.....	59
5.5.2 – Teste Sequencial de Mann-Kendall e Teste de Pettitt .....	60
5.5.2.1 – Precipitação .....	61
a – Anual .....	61

<b>b – Período Chuvoso .....</b>	<b>62</b>
<b>c – Período Seco .....</b>	<b>63</b>
<b>5.5.2.2 – Razão de Mistura .....</b>	<b>64</b>
<b>a – Anual .....</b>	<b>64</b>
<b>b – Período Chuvoso .....</b>	<b>64</b>
<b>c – Período Seco .....</b>	<b>65</b>
<b>5.5.2.3 – Vento .....</b>	<b>66</b>
<b>a – Anual, Período Chuvoso e Período Seco .....</b>	<b>66</b>
<b>5.5.2.4 – Amplitude Térmica Diária .....</b>	<b>67</b>
<b>a – Anual .....</b>	<b>67</b>
<b>b – Período Chuvoso .....</b>	<b>68</b>
<b>c – Período Seco .....</b>	<b>69</b>
<b>5.5.2.5 – Temperatura Máxima do Ar .....</b>	<b>69</b>
<b>a – Anual .....</b>	<b>69</b>
<b>b – Período Chuvoso .....</b>	<b>70</b>
<b>c – Período Seco .....</b>	<b>71</b>
<b>5.5.2.6 – Temperatura Mínima do Ar .....</b>	<b>72</b>
<b>a – Anual .....</b>	<b>72</b>
<b>b – Período Chuvoso .....</b>	<b>73</b>
<b>c – Período Seco .....</b>	<b>74</b>
<b>5.6 – Análise de Variância (ANOVA) .....</b>	<b>74</b>
<b>a – Precipitação .....</b>	<b>75</b>
<b>b – Razão de Mistura .....</b>	<b>75</b>
<b>c – Vento .....</b>	<b>75</b>
<b>d – Amplitude Térmica Diária (ATD) .....</b>	<b>77</b>
<b>e – Temperatura Máxima do Ar .....</b>	<b>77</b>
<b>f – Temperatura Mínima do Ar .....</b>	<b>77</b>

<b>6 – CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
<b>7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>81</b>

## RESUMO

Este trabalho busca analisar o impacto de mudanças na cobertura e uso da terra no microclima da região do Submédio do São Francisco. A hipótese é que as interferências antrópicas pela instalação do Complexo Agroindustrial Juazeiro-Petrolina (CAI Juazeiro/Petrolina) na década de 1990 trouxeram para região, além de benefícios econômicos com o aumento da produtividade agrícola, fortes mudanças ambientais pela expansão da agricultura irrigada em áreas de Caatinga. As tendências das alterações em variáveis climáticas foram avaliadas a partir de séries históricas de precipitação, umidade atmosférica, vento, temperaturas máxima e mínima do ar coletadas nas estações de Bebedouro (PE) e Mandacaru (BA), situadas em campos experimentais da Embrapa Semiárido, e na estação meteorológica de Petrolina (PE) pertencente ao INMET. Imagens de satélite foram base para o cálculo do IVDN em quatro períodos da série temporal, permitindo avaliar a expansão das áreas utilizadas para a agricultura irrigada. A análise exploratória dos dados foi feita com o uso de *boxplots*, que ajudou na identificação de anos secos e chuvosos, além de mostrar variações importantes nas demais variáveis meteorológicas. A utilização conjunta de métodos paramétricos (ANOVA e Regressão Linear) e não paramétricos (Mann-Kendall e Pettit) contribuiu para alcançar os objetivos. Os resultados indicam que as mudanças foram mais evidentes na região de Mandacaru, com aumento da umidade atmosférica, ATD e temperatura máxima e redução na temperatura mínima do ar, com resultados significativos estatisticamente observados na Análise de Regressão e na ANOVA. O vento e temperatura mínima do ar foram as variáveis mais afetadas em Petrolina. Já em Bebedouro, as temperaturas foram as mais afetadas, de forma significativa. Os testes de Mann-Kendall e de Pettitt mostraram pontos importantes no período analisado, com mudanças significativas em meados da década de 1990, em algumas variáveis, no período de grandes investimentos financeiros por parte do Governo Federal e implementação do CAI. A expansão das áreas irrigadas contribuiu para o aumento da umidade atmosférica e a redução na intensidade do vento.

Palavras-Chave: Complexo Agroindustrial Juazeiro-Petrolina; Mann-Kendall; agricultura irrigada

## ABSTRACT

This work aims to analyze the impact of changes on soil use and coverage upon the microclimate of the Submiddle São Francisco region. The hypothesis is that the anthropogenic interferences due to the CAI Juazeiro/Petrolina implementation in the 1990 decade brought to the region, besides the economical benefits with the increase in the agricultural productivity, strong environmental changes due to the expansion of the irrigated agriculture in Caatinga areas. The tendencies of alterations in climate variables were evaluated with a basis on historical data series of precipitation, atmospheric humidity, Wind, maximum and minimum air temperatures formed by observations in the Bebedouro (PE) and Mandacaru (BA) stations, located in experimental fields of the Embrapa Semiárido, and in the meteorological station of Petrolina (PE) which belongs to INMET. Satellite images were the basis for calculating the IVDN in four periods of the time series, allowing to assess the expansion of areas used for irrigated agriculture. Exploratory data analysis was performed using boxplots, which helped to identify dry and rainy years, in addition to showing important variations in other meteorological variables. The use in conjunction of the parametric methods (ANOVA and linear regression) and non parametric (Mann-Kendall and Pettitt) contributed for attaining the objectives. The results indicate that the changes were more evident in the Mandacaru region, with an increase in atmospheric humidity, ATD and maximum temperature and a reduction in the minimum air temperature, with statistically significant results observed in the Regression Analysis and ANOVA. Wind and minimum air temperature were the most affected variables in Petrolina. In Bebedouro, temperatures were significantly affected. The Mann-Kendall and Pettitt tests showed important points in the analyzed period, with significant changes in the mid-1990s, in some variables, during the period of large financial investments by the Federal Government and CAI implementation. The expansion of irrigated areas contributed for an increase in atmospheric moisture and a reduction in wind intensity.

Keywords: CAI Juazeiro/Petrolina; Mann-Kendall; irrigated agriculture

## 1 – INTRODUÇÃO

A importância da agricultura irrigada tem se tornado um tema prioritário e central nos debates sobre desenvolvimento de um país e é frequentemente demonstrada em termos de sustentabilidade econômica e ambiental. No Brasil, ainda que insuficientes, estudos sobre expansão do agronegócio e vulnerabilidade ambiental mostram que a construção de grandes reservatórios para geração de energia elétrica foi o mecanismo determinante na transformação recente na sociedade e economia do semiárido (VILAR *et al.*, 2020; EKHTIARI *et al.*, 2017; CORREIA *et al.*, 2006 a,b).

A construção do reservatório da Usina Hidrelétrica de Sobradinho (1973-1977), que favoreceu o surgimento do maior polo agroindustrial, o Petrolina-Juazeiro, situado no Vale do São Francisco, é um exemplo de sucesso. Em contrapartida, neste caso específico, em função da degradação da vegetação nativa (Caatinga), a expansão agrícola também foi impulsora das grandes transformações ambientais e conflitos na gestão dos recursos hídricos (CABRAL JUNIOR *et al.* 2019; BARBIERI *et al.*, 2013; CORREIA *et al.*, 2006b).

Na literatura são vários os estudos que ressaltam a importância do monitoramento e da previsão de mudanças na ocupação e uso do solo em regiões semiáridas, bem como a necessidade de verificações sucessivas de possíveis impactos no desenvolvimento sustentável. Entretanto, são poucas as pesquisas que enfocam os efeitos das adaptações agrícolas em escala local ou regional para tomadas de decisões futuras. Uma visão mais ampla sobre adequação regional às mudanças ambientais é quase inexistente. Portanto, nesse estudo pretendemos identificar adaptações implementadas em nível de explorações agrícolas em áreas de caatinga e seus efeitos no clima local.

O Polo Petrolina-Juazeiro, situado na região semiárida do Nordeste brasileiro, é hoje o maior centro produtor de manga e uva do país, respondendo por 93% das exportações dessas frutas destinadas ao mercado mundial (VALEXPOR), além disso, a região possui uma área considerável de cultivo de cana-de-açúcar, como também outras culturas para atender a demanda local. Com investimentos significantes do Governo Federal na década de 1990, passou por grandes transformações agrárias e aprimoramentos significantes das atividades agrícolas, o que resultou em mais tecnologia e um crescente aumento da produtividade de frutas na região.

O semiárido brasileiro tem como características marcantes a irregularidade do regime pluviométrico, temperaturas elevadas na maior parte do ano e a grande incidência de radiação

solar. Neste contexto, mudanças no padrão de comportamento de variáveis atmosféricas na região do polo Petrolina-Juazeiro, resultantes da diversificação de tecnologias na produção agrícola pode indicar fatores adicionais com influência substancial no clima local e, conseqüentemente, nos recursos hidrológicos da região. Esse tipo de transformação representa uma reestruturação do espaço agrário local com impactos no gerenciamento de recursos naturais e planejamento de projetos ambientais elaborados com vistas no desenvolvimento sustentável (BARBIERI *et al.*, 2013 e 2017).

A análise de tendências climáticas e testes de hipóteses estão entre os principais métodos utilizados em estudos de impactos ambientais e são precursores no auxílio da avaliação das conseqüências sobre a degradação dos recursos naturais em virtude do uso e ocupação do solo sem planejamento. Nosso intuito foi utilizar técnicas estatísticas paramétricas e não paramétricas como ferramentas e aplica-las às séries históricas de dados observacionais coletados em três estações climatológicas (Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE) que compõem nossa região de estudo como uma alternativa para aumentar a compreensão sobre o papel relativo de ações antrópicas na variabilidade de parâmetros meteorológicos relevantes em gerenciamento de áreas diferenciadas pela expansão da agricultura irrigada.

Com isso, essa pesquisa teve os seguintes objetivos:

### **1.1 – Objetivo Geral**

Identificar adaptações implementadas em nível de explorações agrícolas em áreas de caatinga e seus efeitos no clima local.

### **1.2 – Objetivos Específicos**

- Estimar a influência das alterações e evolução no uso e ocupação do solo no Polo Petrolina-Juazeiro no comportamento de variáveis atmosféricas;
- Avaliar o potencial da Amplitude Térmica Diária (ATD) para a análise de mudanças climáticas nessa região.

## **2 – HISTÓRICO DA FORMAÇÃO DO COMPLEXO AGROINDUSTRIAL JUAZEIRO-PETROLINA**

Desde os últimos anos do século XIX, o Nordeste brasileiro (NEB) tem sido beneficiado pela intervenção do Governo Federal, com o objetivo de inserir a Região na economia e sociedade nacional, tendo em vista a disparidade existente em relação às outras Regiões do país. A partir daí, foram criadas organizações públicas para tentar resolver tais questões, a exemplo do Departamento Nacional de Obras Contra a Seca – DNOCS; a Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco – CODEVASF; o Banco do Nordeste do Brasil – BNB; e a Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE (LEITE, 2006).

A semiaridez da Região Nordeste, os fatores climáticos e as secas eram vistas como os maiores causadores das dificuldades enfrentadas pela população e isso favoreceu a intervenção governamental. Até a década de 1950 foram realizadas obras de engenharia hidráulica, como a construção de açudes e perfuração de poços. As grandes secas que ocorreram no Nordeste, a exemplo da de 1931-32, levaram ao surgimento de órgãos governamentais, que foi iniciado com a Inspetoria Federal de Obras Contra a Seca – IFOCS, no ano de 1909, tornando-se o DNOCS, em 1945. Ainda em 1945, com o objetivo de explorar o potencial energético da Região, surge a Companhia Hidrelétrica do Vale do São Francisco – CHESF, que passou a gerar energia elétrica para as indústrias locais. No ano de 1948 nasceu a Comissão do Vale do São Francisco, para gerir os recursos hídricos, especialmente facilitando a comunicação nacional interna por via fluvial.

Na década de 1950, no Brasil, prevalecia uma visão desenvolvimentista e os problemas do Nordeste eram vistos como problemas econômicos. Foi, então, que surgiram o BNB (1952), como agência que iria promover o crédito necessário às atividades produtivas na região; o Grupo de Trabalho para o Desenvolvimento do Nordeste – GTDN (1956) e a SUDENE (1959), que passaria a administrar as concessões e incentivos fiscais aos setores privados.

Segundo Andrade (2005), um dos processos que mais proporcionou mudança ao Nordeste foi a implantação dos sistemas de agricultura irrigada no Vale do São Francisco, mesmo com os impactos negativos sociais sobre as comunidades tradicionais da região e sobre o meio ambiente, por causa das técnicas introduzidas.

[Sampaio et al. \(2004\)](#) apresentou a divisão do Vale do São Francisco, de acordo com as características do perfil longitudinal do Rio, em quatro áreas: Alto São Francisco, Médio São Francisco, Submédio São Francisco e Baixo São Francisco.

O Alto São Francisco situa-se no Estado de Minas Gerais e abrange a barragem de Três Marias, com seu limite à jusante, na cidade de Pirapora. Compreende a parte superior do Rio São Francisco e as sub-bacias dos rios das Velhas, Abaeté, Pará, Jequitaí e Indaiá. O médio São Francisco localiza-se nos Estados de Minas Gerais e Bahia, com limite à jusante no Lago de Sobradinho, à altura da cidade de Rarinhanha, Corrente, Grande e Paramirim. O Submédio São Francisco compreende as sub-bacias dos Rios Pajeú e Moxotó, em Pernambuco e as dos Rios Tourão e Vargem, na Bahia. O Baixo São Francisco compreende as sub-bacias dos Rios Ipanema e Capivara até a foz do Rio no Oceano Atlântico, incluindo áreas dos Estados da Bahia, Alagoas, Sergipe e Pernambuco.

As localidades da área de estudo estão localizadas no Submédio São Francisco, no Polo Juazeiro-Petrolina, onde as obras de irrigação obtiveram maiores impactos sobre as economias locais. Do lado de Petrolina, no Estado de Pernambuco, reúne oito municípios: Petrolina, Lagoa Grande, Santa Maria da Boa Vista e Orocó. Já do lado de Juazeiro, no Estado da Bahia, estão as cidades de Juazeiro, Sobradinho, Casa Nova e Curaçá.

A evolução da agricultura irrigada no Submédio São Francisco foi classificada por [Silva \(2001\)](#) em quatro períodos, que culminou na formação do complexo frutícola, integrado ao mercado externo. O primeiro período, compreendido entre 1950 e 1975, foi chamado pelo autor de embrionário. A atenção das autoridades públicas despertou para o potencial das atividades agrícolas na região após 1950, já que a principal atividade da economia local era a pecuária.

Nesse primeiro período, a fruticultura teve pouca representatividade, já que apenas os proprietários de terras faziam o cultivo de culturas permanentes, como laranja, manga e banana. Assim, a partir de relações de parceria entre meeiros e proprietários, os cultivos tradicionais de mandioca, milho, arroz, feijão, algodão, cebola e cana-de-açúcar forma os maiores impulsores. Marcas desse primeiro período foram o aumento da infraestrutura disponível nos setores de transporte, comunicação e energia, além das primeiras iniciativas de pesquisa e apoio técnico para as culturas irrigadas por meio da Comissão do Vale do São Francisco – CVSF (que seria substituída pela Superintendência do Vale do São Francisco – SUVALE, vinculada ao Ministério do Interior, em 1967) e a implantação de dois períodos experimentais de irrigação, nos anos de 1963 e 1964, Bebedouro e Mandacaru.

O segundo período (1975-1985) iniciou com a implementação dos demais perímetros públicos de irrigação pela CODEVASF, após a viabilidade confirmada pelas experiências dos projetos de Bebedouro e de Mandacaru, além dos estudos realizados desde a década de 1960. Com isso, o Programa de Ação do Governo para o Vale do São Francisco (1975-1979) para o desenvolvimento regional e integração nacional, dentro do II Plano Nacional de Desenvolvimento (II PND) permitia o uso de recursos do Tesouro Nacional, além da realização de empréstimos externos.

A década de 1970 foi marcada por grandes modificações ambientais na região do Submédio São Francisco, com a construção da represa de Sobradinho (1973-1977), para regularizar a vazão do rio, tendo como consequência direta consideráveis alterações na cobertura do solo. A represa forma o maior lago artificial da América Latina, com uma extensão de 280 km, inundando uma área de, aproximadamente, 4.214 km<sup>2</sup>, represando cerca de 34 bilhões de metros cúbicos de água. Para a formação do lago, foi necessária a inundação parcial de terras dos municípios de Juazeiro, Sento Sé e Xique-Xique na margem direita do Rio São Francisco, e de Casa Nova, Remanso e Pilão Arcado, na margem esquerda (CORREIA, 2001). Inicialmente, com o propósito de gerar energia elétrica com a Usina Hidrelétrica de Sobradinho, a presença do lago teve papel importante para o desenvolvimento da fruticultura irrigada no Vale do São Francisco.

Foi nesse segundo período que houve ações mais enfáticas com o intuito de formar um complexo agroindustrial pelas instituições, principalmente o BNB e a SUDENE, alocando financiamentos na atração de capitais do Centro-Sul, para promover a operação de agroindústrias, com destaque às de concentrados de tomates, sucos e doces de frutas. A produção de insumos e equipamentos para o setor agrícola também passou a ser incentivada, fazendo com que fábricas de equipamentos para irrigação, adubos e sementes fossem instaladas, estabelecendo-se nos municípios de Juazeiro-BA e Petrolina-PE.

A consolidação de um polo agroindustrial favoreceu as culturas de ciclo curto, a exemplo do tomate, que passou a ter demanda por parte das empresas processadoras. Desta forma, até 1980, foi inexpressiva a área cultivada com manga, uva e outras frutas, que hoje apresentam uma grande expressividade na região. Na década de 1990, no entanto, que a fruticultura se consolidou como centro da economia regional, depois da crise de financiamento da agricultura e do fracasso da agroindústria local (SILVA, 2001).

No ano de 1976 foi fundado o Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido – CPATSA, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, em Petrolina-PE, que passou a fazer a manutenção e a operacionalização das estações experimentais de Bebedouro e Mandacaru. A criação do CPATSA/EMBRAPA teve como objetivo inserir na região um conjunto de instituições públicas de planejamento, pesquisa e fomento ligados à agricultura.

A terceira etapa na evolução da agricultura irrigada no Submédio São Francisco, segundo [Silva \(2001\)](#), ocorreu entre 1985 e 1994. Nesse período, o desmantelamento do padrão de financiamento para a agricultura, juntamente com a crise do Estado, faz com que se mostre inviável o sistema agroindustrial local. Com isso, os produtores agrícolas sobreviventes a essa situação passam a investir em culturas como a manga e a uva, principalmente, além de banana, goiaba, coco e pinha, voltadas para o mercado interno, especialmente para os principais centros consumidores de frutas *in natura* localizados no Centro-Sul e na região Nordeste, que possuíam um grande potencial de demanda.

Foi nesse íterim que ocorreu a expansão da fruticultura e tiveram destaque as culturas de manga e uva, destinadas à exportação, que, já em 1987, tornaram-se as principais fruteiras cultivadas, principalmente a manga, tornando-se um grande impulso na região. Isso fez com que se formasse uma base exportadora de frutas na região, que atingiu seu desempenho com os efeitos do Plano Real, a partir de 1994, considerado o início do último período de evolução do complexo de produção de frutas, estendendo-se até o ano de 1999. Considerando a melhor distribuição de renda no Brasil, logo quando foi implementado o Plano Real, e as novas exigências dos mercados externos naquele período, o mercado interno tornou-se mais atraente, com as medidas de estabilização da economia e do controle cambial reduzindo o interesse pelas exportações naquele momento.

A especialização em fruticultura se consolidou no Submédio São Francisco no período 1995-1999. Com isso, a exportação voltou a crescer e, no caso da manga, por exemplo, já em 1996, a região correspondia a 87,2% das exportações brasileiras e 7,0% das exportações mundiais ([SILVA, 2001](#)). A vinculação dessa produção a mercados exigentes, principalmente os internacionais, exigiu que o Submédio São Francisco desenvolvesse características e habilidades para que pudesse participar desse tipo de comércio e tais exigências provocou transformações sociais, econômicas e políticas na localidade ([CORDEIRO NETO e ALVES, 2009](#)).

Em relação ao comércio de frutas, o Polo Juazeiro-Petrolina é uma das principais áreas relacionadas aos *superávits* da balança comercial brasileira, fazendo com que o país esteja posicionado como o terceiro maior produtor do mundo, batendo recordes, ano após ano, na produção e exportação de frutas.

### 3 – REVISÃO DA LITERATURA

Diversas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de avaliar impactos ambientais resultantes de ações antrópicas e sua relação com mudanças no clima. Os resultados desses estudos vêm beneficiando setores responsáveis por gerenciamento e uso dos recursos naturais. Devido a importância do Polo Juazeiro-Petrolina para a economia nacional, várias pesquisas são realizadas nessa região.

Em um estudo para avaliar o impacto da expansão agrícola em ambiente semiárido, na amplitude térmica diária (ATD), séries históricas da temperatura e umidade (razão de mistura), obtidas nos campos experimentais da EMBRAPA-SEMIÁRIDO (Bebedouro-PE e Mandacaru-BA) em associação com registros das Normais Climatológicas (1961-1990), formaram o principal conjunto de dados do estudo. [Correia et al. \(2011\)](#) observaram que a expansão agrícola causou redução da ATD e aumento da nebulosidade, devido à irrigação nas áreas de vegetação esparsa, elevando o teor de umidade da atmosfera.

Com o objetivo de avaliar o desempenho de métodos alternativos utilizados pela FAO (Food and Agriculture Organization) e pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) na estimativa da temperatura média diária do ar na região do Polo de irrigação Petrolina-Juazeiro, [Barbieri et al. \(2013\)](#) utilizaram técnicas estatísticas (regressão linear e coeficientes de determinação). Os resultados indicaram alterações no comportamento da variável em três períodos distintos: 1969 a 1979 (com fortes mudanças ambientais decorrentes da construção da represa de Sobradinho; 1980 a 1990 (década que representa grandes modificações no uso do solo pela implantação da agricultura irrigada em áreas de Caatinga) e entre 1990 e 2011 (período que caracteriza crescimento do agronegócio, não apenas em decorrência da expansão agrícola, mas principalmente pela mudança de culturas anuais para fruticultura irrigada). Os autores verificaram também que a evolução temporal da temperatura é extremamente sensível às mudanças no uso e cobertura da terra e que o aumento no teor de umidade na baixa troposfera, decorrente da expansão agrícola em área de Caatinga, contribui para a absorção da energia calorífica e elevação da temperatura noturna (temperatura mínima).

Para avaliar o impacto de variações climáticas e de mudanças no uso da terra, [Barbieri et al. \(2017\)](#) aplicaram o teste de Mann-Kendall Sequencial nas séries temporais da umidade relativa, entre os anos de 1975 a 2014, dos perímetros irrigados de Bebedouro (PE) e Mandacaru (BA) no vale do Rio São Francisco, para o período seco (maio a outubro) e para o mês de outubro. Após serem retiradas as influências da tendência linear e da sazonalidade, os autores

observaram tendências de aumento e diminuição dessa variável atmosférica, possivelmente relacionadas às alterações naquela região ao longo do tempo.

Através da análise dos índices de mudanças climáticas calculadas pelo RClimdex, [Melo et al. \(2018\)](#) apresentaram novas informações sobre as tendências dos extremos climáticos relacionados com a temperatura do ar e com a precipitação para a região do lago da Usina Hidrelétrica de Sobradinho (UHS). Foram utilizadas séries de precipitação diária no período de 1966 a 2014 das localidades de Bebedouro-PE e Mandacaru-BA, além de dados mensais, para o mesmo período, da temperatura da superfície do mar (TSM) do Oceano Pacífico Equatorial (nas regiões do Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4) e dos Oceanos Atlântico Norte e Sul. Esses dados foram submetidos aos testes estatísticos de Mann-Kendall, Sen-Slope, Pettitt e a Correlação de Spearman. Os autores concluíram não ser possível afirmar alteração no microclima local devido à construção do lago de Sobradinho. Apesar de observadas tendências de aumento na temperatura máxima, quantidade de dias quentes e amplitude térmica diária, tais mudanças não poderiam ser atribuídas à formação do lago, mas à influência da TSM dos Oceanos Tropicais no comportamento temporal de alguns dos índices utilizados na pesquisa.

Em áreas agrícolas de Juazeiro (BA) e Petrolina (PE), [Cabral Junior et al. \(2019\)](#) analisaram indicações de tendência linear da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) nas escalas mensal, anual e interdecadal. Os autores utilizaram os testes estatísticos não-paramétricos de Mann-Kendall, de Pettitt e de Sen para detectar tendência, o início dela e sua magnitude, além da análise de variância (ANOVA) para identificar diferenças significativas entre valores médios interdecadais. Foram encontradas tendências decrescentes significativas da  $ET_0$ , com declínios de 14,5 mm/ano em Juazeiro e de 7,7 mm/ano em Petrolina, com início no ano de 1996. Os autores associaram esses decréscimos à ampliação de áreas agrícolas irrigadas e à presença do lago de Sobradinho, à montante dessas áreas.

Na literatura, é possível observar, ainda, um aumento do interesse por técnicas estatísticas não paramétricas na avaliação desses impactos e os testes de Mann-Kendall e de Pettitt, destacam-se como os mais aplicados na avaliação de tendências utilizando séries históricas. Além destes, a Análise de Regressão Linear, Análise de Variância (ANOVA), modelos estatísticos, técnicas de Sensoriamento Remoto e outros testes estatísticos que avaliam a magnitude das mudanças também são bastante utilizados.

Com o uso da análise de regressão e dos testes não-paramétricos: Run, Mann-Kendall e Pettitt, foram analisadas tendências anuais nas séries temporais de temperatura e precipitação

de Urussanga-SC, entre 1924 e 1998, por [Back \(2001\)](#). O autor observou tendência positiva significativa na temperatura média anual e na temperatura média de janeiro. Na precipitação, foi encontrada uma tendência positiva significativa no total anual e no quarto trimestre.

Aplicando os testes de Mann-Kendall e de Pettitt às séries de vazão dos rios Tietê e Piracicaba, no Estado de São Paulo, entre os anos de 1965 e 1996, [Mortatti et al. \(2004\)](#) tiveram como objetivo analisar o comportamento hidrológico desses sistemas hídricos. Os resultados asseguraram a influência antrópica no comportamento desses rios nos últimos vinte anos.

Buscando detectar tendências de elevação nas séries anuais de temperatura mínima e a data inicial dessas possíveis alterações em seis localidades do Estado de São Paulo, [Blain et al. \(2009\)](#) utilizaram o teste de Mann-Kendall. Os autores não observaram tendências significativas nos dados anuais da temperatura mínima, o que sugeriu a sobreposição de fatores de escala local aos de escala global como principais forçantes radioativas que causaram o aumento médio dos valores da variável estudada.

No período de 1966 a 2005, [Tabari e Talaee \(2011\)](#) investigaram tendências das temperaturas máximas e mínimas do ar nas escalas anual, sazonal e mensal de 19 estações sinóticas nas regiões áridas e semiáridas do Iran. Os autores observaram tendência positiva nas temperaturas nas últimas décadas, no entanto, o acréscimo na temperatura mínima foi mais forte do que na temperatura máxima. As tendências de aquecimento das temperaturas foram mais evidentes no verão e no inverno do que no outono e primavera.

A vulnerabilidade dos sistemas de produção animal no semiárido brasileiro às mudanças climáticas, utilizando modelagem numérica, foi estudada por [Santos et al. \(2011\)](#). Para a identificação de áreas mais vulneráveis foram analisados cenários futuros para a produção de *Brachiaria brizantha*, *Panicum maximum*, *Cenchrus ciliaries* e *Opuntia ficus*. Os modelos identificaram algumas áreas de maior vulnerabilidade, possibilitando a sugestão de alternativas de adaptação dos sistemas de produção aos possíveis impactos negativos das mudanças climáticas globais na região. Uma alternativa é o desenvolvimento de técnicas para o uso sustentável da Caatinga como pasto nativo para reduzir a degradação deste bioma e os riscos de desertificação. Modelos melhores para projeção regionalizada de chuva e temperatura têm sido desenvolvidos, o que permitirá um estudo mais preciso dos possíveis impactos das mudanças climáticas sobre a pecuária no semiárido brasileiro.

Na região de Chapadinha-MA, foi conduzido um estudo por [Nogueira et al. \(2012\)](#) sobre o efeito do cultivo de soja e sua expansão, utilizando a técnica da análise de variância e o teste t-Student. A pesquisa mostrou que a umidade e a temperatura do ar sofreram variação substancial na década pós-soja. As alterações foram mais significativas na temperatura mínima. Os autores ressaltaram que as variações podem ter sido resultantes tanto de fatores em escala local como decorrentes da influência de processos meteorológicos de grande escala. Metodologia semelhante foi utilizada com êxito na avaliação de influências de impactos ambientais resultantes de grandes empreendimentos hidrelétricos no comportamento de variáveis atmosféricas, como no caso da construção das usinas hidrelétricas de Itaipu ([GRIMM, 1988](#)) e de Sobradinho ([CORREIA et al., 2006a](#)). A mudança no padrão de vento local representou o efeito mais significativo na baixa atmosfera.

A presença de tendências nas séries temporais de precipitação na Região Sul do Brasil foi avaliada por [Pinheiro et al. \(2013\)](#), utilizando o teste de tendência de Mann-Kendall. Os autores verificaram uma tendência positiva dos máximos diários anuais, além de uma elevação significativa dos totais mensais e anuais na maioria das estações.

Buscando identificar e analisar a ocorrência de tendências sazonais na temperatura média, precipitação pluviométrica e vazões de rios em localidades da bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia, [Penereiro et al. \(2015\)](#) usaram análise de regressão linear e os testes de Mann-Kendall e de Pettitt. Os resultados indicaram que a maior parte dos locais avaliados não apresentou tendência na precipitação pluviométrica. No entanto, nos dados de vazão e da temperatura média, em alguns locais, ocorreram tendências significativas, dependendo do período sazonal examinado.

Através de informações de satélite e de técnicas estatísticas paramétricas e não-paramétricas, incluindo os testes Sequencial de Mann-Kendall e o teste de Pettitt, para detectar mudanças no padrão de comportamento de variáveis atmosféricas resultantes da transformação da vegetação nativa em áreas agrícolas (monocultura da soja), [Nogueira \(2015\)](#) avaliou as conexões entre degradação ambiental no bioma Cerrado e mudanças climáticas na região de Chapadinha-MA. Os resultados da pesquisa indicaram que o processo de degradação da vegetação nativa teve início antes da inserção da soja, mas que essa cultura foi determinante para impactar significativamente o clima local. Também foi evidenciado o impacto antrópico nas temperaturas máxima e mínima da região.

Na bacia do rio Yihe, na China, [Saifullah et al. \(2016\)](#) fizeram uma estimacão do impacto da precipitao e mudanças na superfície da terra no processo hidrológico dessa região. Os autores utilizaram dados do intervalo de anos entre 1961 a 2011 da precipitao e do escoamento e aplicaram vários testes para analisar tendências e mudanças bruscas na série temporal, incluindo os testes de Mann-Kendall, Pettitt e regressão linear. Foi observada uma tendência decrescente no escoamento anual e uma mudança significativa que ocorreu no ano de 1985. O uso desses testes revelou que a reduo no escoamento anual está relacionada à variabilidade de precipitao de 56,38-67,68% e à variao da superfície de terra 43,62-32,32%, estimativa revelada pelos métodos de elasticidade de precipitao e regressão linear, respectivamente. Foi verificado também que o rápido crescimento da urbanizao influenciou no aumento da mudança na superfície da Terra no período de 1990 a 2010.

Com uma série de 50 anos (1964-2013), em uma região no norte de Bangladesh, [Bari et al. \(2016\)](#) investigaram tendências de precipitao sazonais e anuais e suas flutuaoes ao longo do tempo. O teste não-paramétrico de Mann-Kendall e o estimador Sen-Slope foram usados para avaliar as tendências de precipitao e as suas magnitudes. Já o teste Sequencial de Mann-Kendall foi utilizado para verificar flutuaoes nas tendências ao longo do tempo e possíveis pontos de mudança na série de dados. Na maioria das estaoes estudadas, foi observado um aumento nas chuvas pr-moo e ps-moo, exceto na localidade de Ishurdi que apresentou um decréscimo na precipitao pr-moo de 1,28 mm/ano. O teste sequencial de Mann-Kendall detectou uma tendência decrescente de chuva antes do início dos anos 90. Uma tendência de aumento de chuvas foi encontrada em Cravo, a uma taxa de 2,02 mm/ano. Todas as tendências encontradas, positivas e negativas, não foram estatisticamente significativas, ao nível de confiança de 95%, exceto para mooes e precipitao anual na estao de Raishani. Flutuaoes periódicas também foram identificadas nos resultados desse estudo.

As possíveis mudanças climáticas em uma área semiárida na bacia de Essaouira, localizada na Costa Atlântica do Marrocos foram estudadas por [Ouhamdouch e Bahir \(2017\)](#). Os padrões atuais de temperatura e precipitao e as mudanças futuras esperadas (2018-2050) são investigados usando o Canadian Earth System Model (CanESM2). O modelo de downscaling estatístico (SDSM) foi usado para a reduo de escala. Os testes de Mann-Kendall e Pettitt foram usados para determinar a tendência e o ponto de mudança das séries, respectivamente. A aplicao dos resultados do SDSM com os testes de Mann-Kendall e Pettitt apontaram uma tendência decrescente de precipitao anual para o Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 (17,29%) e tendências de aumento para o RCP 2.6 (12,50%)

e RCP 8.5 (21,33%). Foi observado um aumento da média anual da temperatura em 0,72 °C (RCP 2.6), 0,57 °C (RCP 4.5) e 0,69 °C (RCP 8.5) e também foi previsto um encurtamento da estação chuvosa de cinco para quatro meses na área de estudo.

Utilizando séries de dados de 22 estações pluviométricas na província de Fars, região semiárida do Iran, [Khosravi et al. \(2017\)](#) estudaram a variabilidade da precipitação com o intuito de avaliar possíveis tendências anuais e sazonais, além de pontos de mudança bruscas, no período de 1972 a 2011. Para isso, os autores aplicaram os testes de Mann-Kendall e de Sen-Slope para determinar tendências nas séries temporais e, para identificação de pontos de mudança, os testes de Pettitt, o teste de homogeneidade normal padrão, o teste de Buishand e a razão de Von Neumann. Os resultados dos testes para a tendência mostraram um decréscimo da precipitação em todas as estações, exceto na de Monje, muito embora nenhuma tendência tenha sido significativa. Todos os testes indicaram que não houve mudança abrupta visível nas séries temporais, exceto no período de inverno para as estações de Ali Abad Khafr, Tangab e Ramjerd.

Com uma série de 70 anos de dados diários, entre 1945 a 2014, de 200 estações pluviométricas, [Hajani e Rahman \(2017\)](#) realizaram um estudo para examinar mudanças no comportamento da precipitação em New South Wales (NSW), Austrália. Foram aplicados os testes de Mann-Kendall e o de Pettitt, para avaliar tendência e pontos de mudança na série, além dos testes de Van Bell e Hughes para a examinar a homogeneidade das tendências observadas. Os autores verificaram que uma tendência negativa no total anual e nas chuvas de outono e primavera ocorria na metade sul de NSW. Já o teste de Pettitt apontou para um desvio negativo nos dados anuais máximos de precipitação de 24 horas. Os testes de homogeneidade mostraram tendências não homogêneas nos dados mensais de precipitação máxima diária. Apesar de haver o registro de tendências, não foi observado nenhum padrão significativo na precipitação de NSW no período analisado.

Ao longo da bacia do Rio São Francisco, [Penereiro e Garcia \(2017\)](#) realizaram análises estatísticas da variabilidade anual das temperaturas mínima, média e máxima, das precipitações pluviométricas e dos índices de vazão, onde foram utilizados a Análise de Regressão Linear e os testes não-paramétricos de Mann-Kendall e Pettitt, a fim de identificar pontos de mudança no comportamento hidrológico e climático nas séries temporais de 39 localidades. Os resultados mostraram que a maioria das localidades não registrou tendências climáticas, principalmente na precipitação. Em relação aos dados de vazão, não foram encontradas tendências nas

localidades à montante da Barragem de Sobradinho. No entanto, as localidades à jusante dessa barragem apresentaram tendências a partir do ano de 1986, que coincide com o início da operação da barragem, o que pode ser uma das causas de mudanças ambientais verificadas naquela região.

Com uma série de dados do período de 1961 a 2010, em 34 estações sinóticas do Irã, [Ahmadi et al. \(2018\)](#) examinaram as tendências de longo prazo na temperatura em escalas de tempo sazonais e anuais utilizando dois métodos derivados do Mann-Kendall, sendo um com a eliminação dos efeitos de todos os coeficientes de autocorrelação significativos e o outro chamado de teste regional de Kendall, além de usarem também o teste de Pettitt. Os resultados mostraram tendências significativas positivas durante o outono, primavera e, especialmente no verão. Já na análise regional, utilizando o método de agrupamento K means, as estações foram divididas em cinco clusters. O teste regional de Kendall também mostrou tendências de aumento na temperatura em todo o país, tanto em escala de tempo sazonal quanto anual. O teste de Pettitt, utilizado para detectar pontos de mudança da temperatura média, indicou que houve uma maior frequência dessas mudanças entre os anos de 1986 e 1994.

Com dados mensais de precipitação acumulada e de temperatura média do ar registrados em 243 localidades, distribuídas pelos biomas brasileiros, no período de 1961 a 2015, [Penereiro et al. \(2018\)](#) buscaram identificar tendências climáticas nas quatro estações do ano. Foram aplicados, para isso, os testes estatísticos de Mann-Kendall e de Pettitt. Todos os biomas exibiram ausência de tendências significativas em ambas as variáveis meteorológicas. A temperatura média foi a variável que mais mostrou tendências positivas, principalmente durante a década de 1990, nos biomas Amazônia e Cerrado. Tendências negativas foram encontradas na Caatinga e no Cerrado, durante as estações do outono, inverno e primavera. Já para a precipitação, as tendências encontradas foram negativas em todas as estações do ano. No entanto, tendências positivas foram observadas durante a primeira década dos anos 2000, nos biomas Floresta Amazônica e Mata Atlântica, durante o outono e inverno. Os autores sugerem que essas tendências podem ser relacionadas aos eventos El Niño e La Niña.

Tendo em vista as previsões dos impactos na disponibilidade de recursos hídricos devido às mudanças climáticas, [Carvalho et al. \(2019\)](#) buscaram analisar as tendências no regime pluvial, no número de dias de precipitação e na temperatura do ar em 45 estações meteorológicas pertencentes ao INMET, situadas em diferentes condições de altitude e continentalidade no Nordeste brasileiro. Foram utilizadas a análise de regressão e teste não-

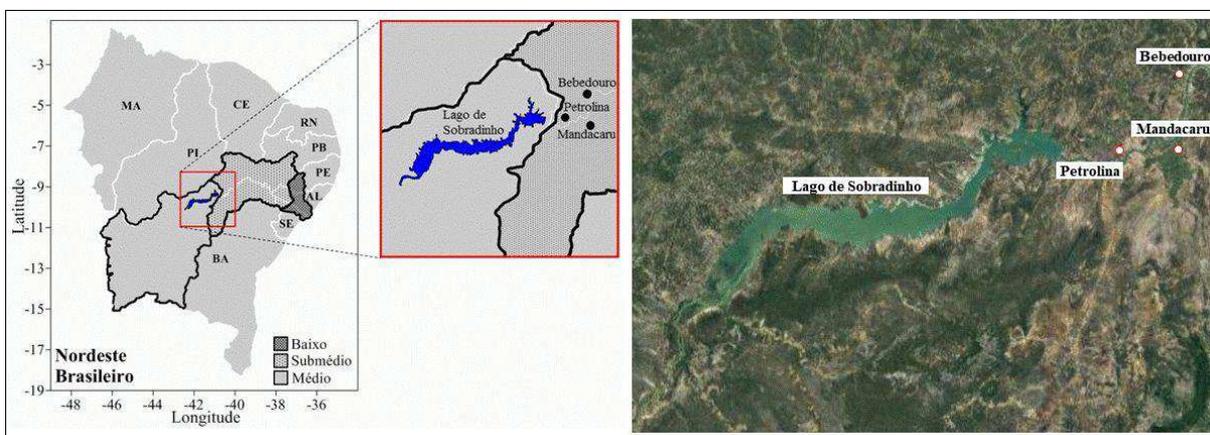
paramétrico de Mann-Kendall para investigar a tendência da precipitação e do número de dias de chuva, para os níveis de significância de 0,01 e 0,05. Foram observadas tendência de redução no número de dias de chuva nas estações localizadas na faixa litorânea, além de redução na precipitação e no número de dias de chuva, nas estações localizadas mais distantes do litoral. Nas estações presentes entre 400 e 600 km do litoral não foram observados efeitos significativos. Já para a temperatura, exceto para a estação meteorológica de Maceió-AL, foram encontradas tendências positivas.

Para investigar a influência de eventos naturais e atividades antropogênicas na seca hidrológica na Coreia do Sul, [Jehanzaib et al. \(2020\)](#) utilizaram o teste sequencial de Mann-Kendall e dois modelos de balanço hídrico, o ABCD e o GR2M para simular vazões. Os autores pesquisaram os efeitos distintos da precipitação, temperatura e atividades humanas nas secas hidrológicas em cinco bacias hidrográficas da Coreia do Sul e identificaram pontos de mudança nos dados hidrológicos em todas as bacias, após a década de 1990, a partir do teste sequencial de Mann-Kendall. O estudo mostrou que variações naturais e antropogênicas tiveram um efeito maior na severidade da seca do que na duração da seca. A variação observada na precipitação fez com que a vazão aumentasse em 12,42%, seguida pela atividade humana em 0,71%. Já a temperatura reduziu o fluxo em -0,7%, em média. Os autores também concluíram que a precipitação foi um fator dominante, contribuindo com a severidade da seca em 41,38%, seguida pela atividade humana em 15,85%. A temperatura reduziu a severidade da seca em -0,86%, em média.

## 4 – DADOS E METODOLOGIA

### 4.1 – Área de Estudo

O polo Juazeiro-Petrolina está situado entre os paralelos de 9 °S e 11 °S e os meridianos de 40 °W e 42 °W. Na Figura 4.1, observa-se a localização da represa de Sobradinho, no extremo leste da região do médio São Francisco e, no destaque, na região do submédio São Francisco, estão as localizações das estações climatológicas de Bebedouro e Petrolina, em Pernambuco e de Mandacaru, na Bahia. Na imagem de satélite, mais à direita, observa-se as áreas vegetadas próximas às estações. Petrolina estará representando uma área urbana, enquanto que Bebedouro e Mandacaru serão representativas de áreas rurais.



**Figura 4.1** – Nordeste brasileiro, com destaque para as sub-regiões do baixo, submédio e parte do médio da BHSF, localização geográfica do lago de Sobradinho e das estações climatológicas. Fonte: [elaborada pelo autor/ Google Earth](#).

Na região do Vale do Rio São Francisco, o período chuvoso ocorre entre os meses de novembro e abril, sendo março o mês com a maior média histórica, com valores acima de 100 mm registrados nas estações meteorológicas utilizadas nesta pesquisa (114,7 mm em Bebedouro-PE; 118,6 mm em Mandacaru-BA e 109,8 mm em Petrolina-PE). Entre os meses de maio e outubro está presente o período seco na região, em que ocorre baixa frequência de sistemas precipitantes, devido a atuação mais forte da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), dificultando a formação de nuvens de chuva. O mês de janeiro geralmente registra uma maior incidência de Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) na Região Nordeste e, quando as bordas convectivas desses sistemas estão sobre uma determinada área, essa região terá registro de precipitação. O contrário ocorre nas áreas sob a influência da área central do VCAN, que apresentará céu limpo, devido à alta pressão presente nessa região do sistema.

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um outro importante sistema que provoca chuva nesta região e o mês de março geralmente é quando ela está mais intensa, antes de começar a migrar para o hemisfério norte. Em algumas situações, Sistemas Frontais (SF) podem atingir latitudes mais baixas do Brasil e, juntamente com a ZCIT podem resultar em elevados registros pluviométricos.

#### 4.2 – Dados

Foram utilizados dados obtidos a partir de diferentes fontes:

- Séries históricas de médias mensais de observações coletadas nas estações climatológicas situadas em Bebedouro-PE (09°09' S; 40°22' W; 365,5 m) e em Mandacaru-BA (09°24' S; 40°26' W; 375 m), pertencentes ao CPATSA/EMBRAPA (Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido/ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) no período de anos entre 1975 e 2014;
- Dados mensais da estação climatológica de Petrolina-PE (09°22' S; 40°28' W; 370,5 m), entre os anos de 1975 a 2014, fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) a partir do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP);

Das séries disponíveis para as três estações, foram usadas as seguintes variáveis:

- Precipitação (mm): os dados da precipitação são coletados diariamente, às nove horas da manhã, a partir do pluviômetro, registrando a quantidade de chuva das últimas vinte e quatro horas. Nesta pesquisa, foram utilizados os totais mensais, em mm (milímetros de chuva);
- Velocidade do vento a 10 m (km/dia): foram utilizados dados da estação climatológica de Petrolina, a 10 metros de altura. As estações de Bebedouro e Mandacaru, como são estações agrometeorológicas, só apresentam dados do vento a 2 metros de altura, mais utilizados para pesquisas relacionadas à agricultura e são bem sensíveis às variações do terreno, enquanto que o vento a 10 metros não sofre essa influência e são mais utilizados em estudos climatológicos. Para esta variável foi utilizada a unidade km/dia (quilômetros por dia);
- Temperatura máxima do ar (°C);
- Temperatura mínima do ar (°C);

Além dos dados de superfície, também foram usadas imagens do satélite Landsat-5, dos canais infravermelho próximo e vermelho.

### 4.3 – Metodologia

#### 4.3.1 – Cálculo de Variáveis Derivadas

A seguir, será descrito como foram calculadas as variáveis derivadas a partir de dados presentes nas séries históricas e nas imagens de satélite.

##### 4.3.1.1 – Razão de Mistura

Para analisar o comportamento da umidade atmosférica, utilizou-se a razão de mistura, em g/kg (grama por quilograma). Por ser um parâmetro conservativo, a razão de mistura permite quantificar com mais exatidão o aumento ou redução no teor de vapor d'água da atmosfera. Os valores foram obtidos com base na equação encontrada em [Vianello e Alvez \(2012\)](#):

$$r = \frac{622 \times e}{(P - e)} \quad (1)$$

Em que:

$e = UR \times e_s(T_m)$  é a pressão real de vapor (mb);

$UR$  é a umidade relativa do ar (%);

$e_s(T_m) = 6,1078 \times 10^{\left(\frac{7,5T_m}{237,3+T_m}\right)}$  é a pressão de vapor de saturação (mb), para  $T_m \geq 0$  °C;

$P$  é a pressão atmosférica (mb).

##### 4.3.1.2 – Amplitude Térmica Diária (ATD)

A ATD representa a variação que ocorre entre as duas temperaturas extremas em um mesmo dia e foi calculada pela diferença entre as temperaturas máxima e mínima, pela equação (3). Seu resultado é dado em °C.

$$ATD = T_x - T_n \quad (2)$$

##### 4.3.1.3 – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

Estimativas do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – IVDN, foram calculadas a partir de imagens do satélite Landsat-5 com o objetivo de avaliar mudanças na cobertura do solo na região da área de estudo. As imagens de IVDN foram obtidas por meio de técnicas de sensoriamento remoto e processamento digital de imagens utilizando o software QGIS, em sua versão 3.0.2.

Como no período chuvoso, a região de Petrolina está quase sempre encoberta por nuvens, foram escolhidas imagens do período seco, em quatro datas, sendo uma para cada década. As datas escolhidas das imagens foram 24 de junho de 1987, 17 de agosto de 1995, 24 de setembro de 2003 e 29 de agosto de 2011.

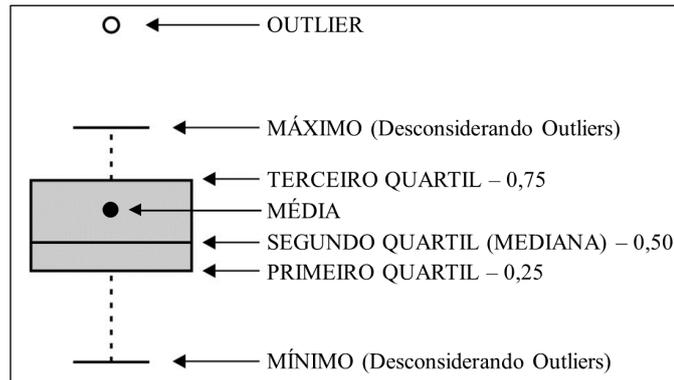
O IVDN ou NDVI do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*, proposto por Rouse *et al.* (1973), foi obtido através da razão entre a diferença das refletividades do infravermelho próximo ( $\rho_{IV}$  - banda 4 – 0,76-0,96  $\mu\text{m}$ ) e do vermelho ( $\rho_V$  - banda 3 – 0,63-0,69  $\mu\text{m}$ ), pela soma das mesmas:

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

O IVDN é utilizado como um indicador sensível da quantidade e da condição (vigor) da vegetação verde. Seus valores variam de -1 a +1 e, para superfícies com alguma vegetação, o IVDN varia entre 0 e +1; já para a água e nuvens, geralmente o IVDN apresenta valores negativos.

#### 4.3.2 – Boxplot

O *boxplot* é uma ferramenta gráfica amplamente utilizada no meio acadêmico, apresentada por Tukey (1977). Ele é representado por cinco amostras de quantis: o mínimo ( $x_1$ ), o quartil inferior ( $q_{0,25}$ ), a mediana ( $q_{0,5}$ ), o quartil superior ( $q_{0,75}$ ) e o máximo ( $x_n$ ), como mostrado no esquema da Figura 4.2. A partir desses cinco valores, o *boxplot* mostra essencialmente um rápido esboço da distribuição dos dados subjacentes, além de poder transmitir rapidamente uma grande quantidade de informações a respeito dos dados. Pode-se adicionar ao gráfico do *boxplot* a representação do valor médio dos dados, que nem sempre irá coincidir com o valor da mediana, podendo auxiliar na interpretação do comportamento dos dados. Se existirem valores muito diferentes nos dados, estes podem fazer com que a média apareça fora da parte central do *boxplot*.



**Figura 4.2** – Esquema básico de um *boxplot*, com a presença de um *outlier* e do valor médio.

A caixa no meio do diagrama é delimitada pelos quartis superior e inferior e, portanto, localiza os 50% centrais dos dados. A barra horizontal no interior da caixa localiza a mediana, enquanto que as linhas pontilhadas verticais se afastam da caixa em direção aos dois valores extremos. Os *boxplots* podem transmitir, rapidamente, uma grande quantidade de informações. Baseando-se somente na mediana e nos quartis, essa região do *boxplot* é altamente resistente à presença de *outliers* (valores atípicos) que possam existir na série de dados. Também fica aparente no gráfico a gama completa dos dados. Finalmente, podemos identificar uma simetria nos dados quando a média/mediana está próxima do centro da caixa e as linhas tracejadas possuem comprimentos semelhantes.

Em muitos casos é útil ter ideia do quão incomuns são os valores extremos, assim, é importante que sejam identificados pontos extremos, que seriam os *outliers*, mencionados anteriormente. O quão esses extremos são suficientemente incomuns dependerá da variabilidade dos dados na parte central da amostra. Um determinado valor extremo é considerado menos incomum se os dois quartis estiverem distantes e mais incomum se os dois quartis estiverem muito próximos.

Para determinar se um dado pode ser considerado um *outlier*, foi utilizado o método baseado na amplitude interquartil (IQR – *Interquartile Range*). O IQR é a diferença entre o terceiro e primeiro quartil, como mostrado a seguir:

$$IQR = q_{0,75} - q_{0,25} \quad (4)$$

Em seguida, foram determinados os limites superior ( $L_{sup}$ ) e inferior ( $L_{inf}$ ) para que possa ser definido se um ponto é ou não um *outlier*, quando este estiver fora dos valores definidos por esse intervalo. Estes limites foram calculados pelas equações seguintes:

$$L_{sup} = \bar{x} + 1,5 \times IQR \quad (5)$$

$$L_{inf} = \bar{x} - 1,5 \times IQR \quad (6)$$

Em que:

$\bar{x}$  é o valor médio da série de dados.

### 4.3.3 – Preenchimento de Falhas por Imputação Múltipla

Os dados das médias mensais foram organizados em planilhas digitais e foi feita a verificação quanto a existência de falhas, isto é, o controle de dados. Valores suspeitos, os quais indicassem a possibilidade de terem sido digitados incorretamente, por exemplo, ou que apresentassem grandes diferenças em relação à média, foram analisados e corrigidos, quando necessário, senão, excluídos. No caso da exclusão ou ausência de dados, foi aplicado o método para o preenchimento dessas falhas, utilizando a série que estivesse completa para determinada variável como base. Ou seja, como as três estações climatológicas são relativamente próximas, no caso da série de temperatura mínima de uma dessas estações apresentar algum período com falta de dados, foram observadas as séries das outras duas estações e escolher uma delas que estiver completa para utilizar como fonte para aplicar o método de preenchimento de falhas. A técnica é descrita a seguir.

Na década de 1970, Donald Bruce Rubin propôs a técnica de imputação múltipla (IM) para resolver o problema de dados incompletos em pesquisas. Porém, apenas recentemente, devido aos desenvolvimentos computacionais para a implementação desta técnica, a IM vem sendo mais utilizada. Esta técnica possibilita a inclusão da incerteza da imputação nos resultados, que é o maior problema associado à imputação única (RUBIN, 1987).

A IM consiste em três etapas:

1. São obtidos  $m$  bancos de dados completos a partir de técnicas de imputação adequadas;
2. Esses  $m$  bancos de dados são analisados, separadamente, por um método estatístico tradicional, como se fossem conjuntos completos de dados;
3. Os  $m$  resultados encontrados na etapa 2 são combinados de um jeito simples e apropriado para obter a chamada inferência da imputação repetida.

As regras de Rubin, ou *Rubin rules*, como são mais conhecidas, estão amplamente difundidas na literatura, pois são regras simples que resolvem a etapa 3 da IM. O objetivo é que, a partir de cada análise, sejam obtidas as estimativas para o parâmetro de interesse  $Q$ , ou

seja,  $Q_j$  para  $j = 1, 2, \dots, m$ , que pode ser qualquer medida escalar a ser estimada. A estimativa combinada será a média das estimativas individuais:

$$\bar{Q} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \hat{Q}_j \quad (7)$$

Para a variância combinada, primeiramente calcula-se a variância dentro das imputações:

$$\bar{U} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m U_j \quad (8)$$

Em seguida, calcula-se a variância entre imputações:

$$B = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\hat{Q}_j - \bar{Q})^2 \quad (9)$$

Finalmente, a variância total, que é a variância combinada, será:

$$T = \bar{U} + \left(1 + \frac{1}{m}\right) B \quad (10)$$

Dentre os vários aplicativos que podem ser utilizados para a realização da análise computacional, o MICE é uma boa alternativa por ser de domínio público, operado dentro do ambiente do aplicativo R.

#### 4.3.4 - Regressão Linear

A análise de regressão linear foi usada para investigar a significância da tendência linear. O teste consiste em determinar o intervalo de confiança do coeficiente  $a$ , sendo que se este intervalo não inclui o valor zero, a tendência é significativa. Na aplicação do método, a série de dados foi definida pela variável  $Y$  (razão de mistura, temperatura do ar, ATD, etc.), no tempo  $t$  (mês). Desta forma,  $Y$  é uma função de  $t$ , representada por  $Y = f(t)$ . A equação da reta de regressão é dada pela expressão:

$$Y' = aX' + b \quad (11)$$

Em que:

$Y'$  é a variável dependente;

$X'$  é a variável independente;

"a" e "b" são os parâmetros da equação da reta, calculados a partir das fórmulas:

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \times \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (12)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x} \quad (13)$$

Em que:

$n$  é o número de observações dos dados amostrais;

$\bar{y}$  é o valor médio da variável  $y$ , obtido pela expressão  $\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$ ;

$\bar{x}$  é o valor médio da variável  $x$ , obtido pela expressão  $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$ .

A partir da equação da reta, se  $a > 0$ , significa que a tendência é crescente e, se  $a < 0$ , a tendência é decrescente. Neste procedimento, o valor da estatística do R-quadrado ( $R^2$ ) retorna uma medida da qualidade do ajuste efetuado. No caso de uma regressão linear, a raiz quadrada do  $R^2$  representa a correlação de Pearson entre  $x$  e  $y$ . O  $R^2$  é obtido a partir da equação:

$$R^2 = \frac{SQ_R}{SQ_T} = 1 - \frac{SQ_E}{SQ_T} \quad (14)$$

Em que:

$SQ_R = \sum (\hat{y}_i - \bar{y}_R)^2$  é a soma dos quadrados da regressão;

$SQ_E = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$  é a soma dos quadrados dos erros;

$SQ_T = SQ_R + SQ_E = \sum (y_i - \bar{y}_i)^2$  é a soma total corrigida dos quadrados.

O valor de  $R^2$  pertence ao intervalo  $[0;1]$  e quanto mais próximo de 1, melhor o ajuste do modelo considerado. Isto é, para uma regressão ser considerada perfeita,  $SQ_R$  deve ser igual à  $SQ_T$  e  $SQ_E$  igual a zero, resultando em  $R^2=1$ . Já para o caso de uma regressão totalmente inútil,  $SQ_R$  deve ser zero e  $SQ_E$  igual à  $SQ_T$ , fazendo com que  $R^2=0$  (WILKS, 2006).

Complementando esta análise, determinou-se o intervalo de confiança em 95% acima e abaixo do valor estimado do coeficiente angular da reta de regressão (MESCHIATTI *et al.*, 2012). Com isso, foi avaliado se as tendências observadas eram significativas ou não, do ponto de vista estatístico.

#### 4.3.5 - Teste Run

Para aplicar o teste sequencial de Mann-Kendall, primeiramente é necessário verificar a homogeneidade da série. O teste recomendado pela Organização Meteorológica Mundial

(OMM), publicado na Nota Técnica nº 81 e que é o mais utilizado na análise de homogeneidade de séries históricas é o teste não-paramétrico chamado de teste de sequência ou *Run Test* (BACK, 2001).

Para testar a homogeneidade das séries históricas das variáveis de Bebedouro, Mandacaru e Petrolina foi utilizado o teste *Run*. A hipótese nula do teste é que a distribuição dos dados ocorre normalmente e que a amostra é aleatória e é testada ao nível de significância de 95% (BACK, 2001).

O teste *Run* é assim denominado devido ao fato do número de oscilações ser chamado de “*run*”. O teste consiste na contagem do número oscilações dos valores acima e abaixo da mediana, em uma série de dados naturalmente ordenada. O número de oscilações deve testar se o valor observado está dentro da faixa de distribuição considerada normal. Um valor alto de *Run* indica muitas oscilações e um valor baixo indica um pequeno desvio em relação à mediana durante o período avaliado.

Se a sequência contém  $N_1$  símbolos de um tipo e  $N_2$  símbolos de outro tipo, e  $N_1$  e  $N_2$  não são muito pequenos, a distribuição amostral do número de Runs total pode ser aproximada pela distribuição normal com média:

$$E(u) = \frac{2N_1N_2}{N_1+N_2} + 1 \quad (15)$$

Enquanto a variância da distribuição pode ser estimada por:

$$Var(u) = \frac{2N_1N_2(2N_1N_2-n)}{n^2(n-1)} \quad (16)$$

Em que  $n = N_1 + N_2$  é o tamanho da série e  $u$  representa o número de Runs. Assim, a hipótese nula de que a distribuição dos símbolos ocorre normalmente e que a amostra é aleatória, pode ser testada com base na estatística:

$$Z = \frac{u-E(u)}{\sqrt{Var(u)}} \quad (17)$$

Esse valor calculado pode ser comparado com valores de  $z$  para distribuição normal. Para o nível de significância de 95%,  $z$  deve estar entre -1,96 e 1,96. Caso  $z$  calculado seja maior que o valor tabelado, deve ser rejeitada a hipótese nula.

### 4.3.6 – Teste Sequencial de Mann-Kendall

Com o objetivo de identificar tendências ou variabilidade climática nas séries temporais, foi utilizado o teste não-paramétrico de Mann-Kendall, proposto inicialmente por [Sneyers \(1975\)](#). Este teste foi concebido para testar a hipótese nula ( $H_0$ ) de ausência de tendência. Tal teste considera que, na hipótese de estabilidade ( $H_0$ ) de uma série temporal, a sucessão de valores ocorre de forma independente e a distribuição de probabilidade permanece a mesma.

Considerando uma série temporal de  $X_i$  de  $N$  termos (grande) ( $1 \leq i \leq N$ ), a soma  $t_n$  do número de termos  $m_i$  da série, relativo ao valor  $X_i$ , cujos termos precedentes ( $j < i$ ) são inferiores ao mesmo ( $X_j < X_i$ ), ou seja:

$$t_n = \sum_{i=1}^n m_i \quad (18)$$

Sob a hipótese nula ( $H_0$ ) de ausência de tendência, ou seja, no caso das séries serem independentes e identicamente distribuídas,  $t_n$  apresentará uma distribuição normal, com média e variância dadas, respectivamente, por:

$$E(t_n) = \frac{N(N-1)}{4} \quad (19)$$

$$Var(t_n) = \frac{N(N-1)(2N-5)}{72} \quad (20)$$

Em seguida, é calculada a estatística  $u(t)$ , dada pela Equação:

$$u(t_n) = \frac{(t_n - E(t_n))}{\sqrt{Var(t_n)}} \quad (21)$$

A hipótese nula é rejeitada, ou não, de acordo com o nível de significância ( $\alpha_0$ ) adotado, a partir de uma tabela da Normal reduzida, em geral de 5%. Se for detectada uma tendência significativa na série temporal superior a 1,96 ou inferior a -1,96, a hipótese nula é rejeitada.

O ponto de início da mudança pode ser observado aplicando-se o mesmo princípio à série inversa. Assim, computa-se o número de termos  $m'_i$  da série  $X_j$ , de forma que, para  $X_i > X_j$ , com  $i < j$ , os valores de  $u^*(t_n)$  para a série retrógrada serão dados pela Equação:

$$u^*(t_n) = -u(t_n) \quad (22)$$

A intersecção das curvas  $u(t_n)$  e  $u^*(t_n)$  indica o ano onde está iniciando uma tendência. Para que esta seja significativa, o ponto de intersecção deve estar entre os valores críticos do

intervalo de confiança, ou seja, entre -1,96 e 1,96. O sinal da curva  $u(t_n)$  indica se a tendência é crescente ou decrescente.

#### 4.3.7 – Teste de Pettitt

As séries temporais também foram analisadas, em busca de rupturas bruscas, ou seja, anos em que houve uma mudança significativa no comportamento da série. Para isso foi aplicado o teste de Pettitt (PETTITT, 1979), também chamado de teste de homogeneidade, complementando a análise do teste Sequencial de Mann-Kendall. Este teste detecta mudanças na variabilidade dos dados observados, apresentando o ano de ruptura, as médias da série antes e após a ruptura e os ganhos ou perdas após a ruptura. Neste estudo, foi considerado um resultado significativo, de acordo com um nível de significância de 5% e 10%.

Este é um teste não-paramétrico que não requer hipótese sobre a distribuição de dados, onde é verificado o número de vezes que um membro de uma amostra é maior que de uma segunda pela Equação:

$$U_{t,T} = U_{t-1,T} + \sum_{j=1}^T \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (23)$$

Para  $t = 2, \dots, T$ , em que:  $\text{sgn}(x) = 1$  para  $x > 0$ ;  $\text{sgn}(x) = 0$  para  $x = 0$  e  $\text{sgn}(x) = -1$  para  $x < 0$ .

$U_{t,T}$  é calculado para os valores de  $1 < t < T$  para compor a fórmula do teste estatístico de Pettitt, para o cálculo do ponto onde houve uma mudança brusca na série temporal, de acordo com a Equação:

$$k(t) = \text{MAX}_{1 \leq t \leq T} |U_{t,T}| \quad (24)$$

A significância da mudança brusca, caracterizada como o  $t$  onde há o máximo de  $k(t)$ , é calculada por:

$$p \cong 2 \exp \left[ \frac{-6k(t)^2}{(T^3 + T^2)} \right] \quad (25)$$

Os valores críticos de  $K$  são calculados através da Equação:

$$K_{crit} = \pm \sqrt{\frac{-\ln(p/2)(T^3 + T^2)}{6}} \quad (26)$$

#### 4.3.8 – Análise de Variância (ANOVA)

A ANOVA é um teste estatístico bastante utilizado em pesquisas das ciências atmosféricas e tem como objetivo verificar se há diferenças significativas entre as médias de dois grupos e se fatores específicos influenciam alguma das variáveis dependentes, como descrito por [Murteira \(1990\)](#). A aplicação da ANOVA visou determinar como fontes específicas de variações contribuiriam para a variação total de alguns parâmetros e verificar se o efeito de um determinado fator seria significativo. Os dados utilizados para a aplicação de um fator de análise de variância devem fazer parte de amostras independentes, com igual variância e originárias de populações normais.

O teste foi aplicado com nível de significância de 5% ( $\alpha=0,05$ ) e a hipótese nula é representada por:

$$H_0: \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \bar{X}_3 = \dots = \bar{X}_m \text{ ou}$$

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \alpha_m = 0 \quad (27)$$

Se  $H_0$  for verdadeira, supõe-se que cada grupo é representação de uma amostra casual de uma mesma população e que cada grupo irá apresentar a mesma média. Existem duas fontes de variabilidade:

- Uma fonte resulta da diferença real entre as populações, denominada "variabilidade entre", na qual, quanto maior a variabilidade mais perceptível é a evidência de diferenças entre as populações de onde as amostras foram coletadas;
- A outra resulta das diferenças dentro de cada amostra, geralmente denominada "variabilidade dentro", em que quanto maior a variabilidade maior é a dificuldade para determinar se as populações são diversas ou não.

As estimativas de variância são combinadas com o propósito de testar  $H_0$ . Também é utilizado o teste-F de Snedecor, que é dado pela razão:

$$F = \frac{\text{variância entre}}{\text{variância dentro}} = \frac{MQE}{MQD} \quad (28)$$

Este valor deverá ser comparado ao F crítico (tabelado) para um dado nível de significância.

Em que:

$$MQD = \frac{SQD}{m(n-1)} \quad (29)$$

$$MQE = \frac{SQE}{m(n-1)} \quad (30)$$

Em que:

SQD (soma dos quadrados dentro dos grupos);

SQE (soma dos quadrados entre os grupos);

m é o número de amostras;

n é o número de observações.

$$SQD = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij}^2 - mn \left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{X_{ij}}{mn} \right)^2 - SQE \quad (31)$$

$$SQE = n \sum_{i=1}^m \bar{X}_i^2 - mn \left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{X_{ij}}{mn} \right)^2 \quad (32)$$

$$\bar{X}_i = \left( \frac{1}{n} \right) \sum_{j=1}^n X_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \text{ (a média do } i\text{-ésimo grupo ou amostra)}$$

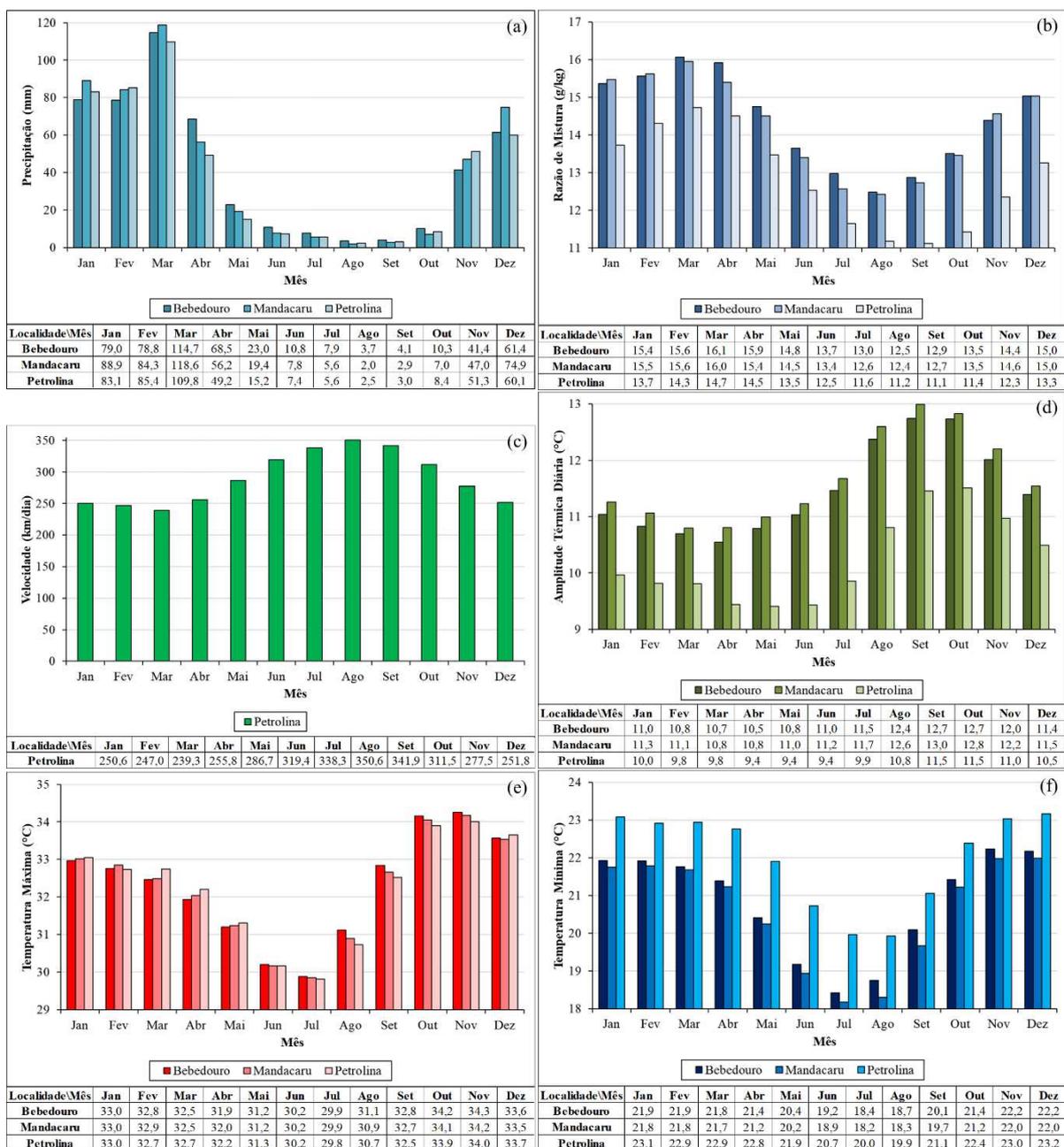
## 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão mostrados o comportamento médio das variáveis estudadas e as análises com o uso de testes estatísticos paramétricos e não-paramétricos. Os testes foram aplicados às séries temporais das médias anuais, mensais e dos períodos chuvoso e seco das variáveis escolhidas, observando se havia significância estatística ao nível de 95% nas tendências encontradas, no caso da Análise de Regressão e aos níveis de 90% e 95% para o teste Sequencial de Mann-Kendall e o teste de Pettitt. Por fim, a Análise de Variância (ANOVA), após dividir a série em dois períodos (grupos), indicou se houve uma mudança significativa entre os dois grupos, auxiliando na identificação da presença de alterações no microclima da região.

### 5.1 – Médias Climatológicas

Para uma melhor compreensão dos resultados apresentados neste trabalho, é importante, inicialmente, conhecer o comportamento médio das variáveis mais relevantes ao estudo desenvolvido, ou o padrão atmosférico da região foco das análises. Na Figura 5.1 são apresentadas as médias climatológicas (1975-2014) da precipitação, razão de mistura, ATD, temperatura máxima e temperatura mínima em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE e da velocidade do vento em Petrolina-PE.

A precipitação nas três localidades, Bebedouro, Mandacaru e Petrolina, mostra um ciclo sazonal bem definido, praticamente com dois períodos distintos: um chuvoso e um seco. O período chuvoso da região ocorre entre os meses de novembro e abril (Figura 5.1a), sendo março o mês que apresenta o maior total de precipitação pluvial. O período chuvoso (novembro a abril) coincide com o da umidade atmosférica (razão de mistura) mais elevada (Figura 5.1b), amplitudes térmicas mais baixas (Figura 5.1d), e temperaturas máximas e mínimas mais elevadas (Figuras 5.1e,f). Além disso, o enfraquecimento dos alísios de Sudeste, entre novembro e abril (Figura 5.1c), também contribui para a atuação de sistemas precipitantes (MELO *et al.*, 2013; CARPENEDO e AMBRIZZI, 2020). Já no período seco, entre os meses de maio e outubro, o comportamento é inverso. As temperaturas são mais amenas, os ventos alísios de Sudeste estão mais intensos, fazendo com que o vento na região atinja velocidades mais elevadas e é observada uma área de alta pressão sobre a região, dificultando o desenvolvimento ou aproximação de sistemas precipitantes.



**Figura 5.1** – Médias climatológicas (1975 a 2014): (a) precipitação; (b) razão de mistura; (a) vento; (d) ATD; (e) temperatura máxima e (f) temperatura mínima em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE.

Climatologicamente, a precipitação total anual em Petrolina (481,0 mm) é inferior à registrada em Bebedouro (503,6 mm) e em Mandacaru (514,6 mm). O mês de março, como foi mencionado anteriormente, é o que registra o maior total de precipitação, com valores acima de 100 mm, enquanto agosto é o mês que menos chove, não chegando a 4,0 mm em nenhuma das localidades.

Pela Figura 5.1b pode ser observado que o comportamento da razão de mistura é bem próximo ao da precipitação. Os meses mais chuvosos apresentam uma umidade média maior que nos meses mais secos. Os valores médios observados em Bebedouro e Mandacaru são bem próximos e superiores aos encontrados em Petrolina, com diferenças de mais de 2 g/kg, em alguns meses. Esse padrão já era esperado, sabendo-se que em uma área urbana a umidade atmosférica é inferior à observada em áreas vegetadas. A evapotranspiração das plantas tem relação direta com a umidade presente nos baixos níveis da atmosfera.

O comportamento médio mensal do vento em Petrolina a 10 metros é observado na Figura 5.1c. As velocidades mais elevadas ocorrem nos meses do período seco, entre maio e outubro, quando a ASAS está mais intensa e dificulta a formação de nuvens de chuva. Os valores mais baixos são observados no período chuvoso, em que os ventos alísios de Sudeste estão mais fracos (enfraquecimento da ASAS), favorecendo a aproximação da ZCIT no Hemisfério Sul, um dos principais sistemas precipitantes para o Nordeste brasileiro, além de outros sistemas que podem atuar nessa região, como VCAN, Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) e até mesmo Sistemas Frontais, que podem atingir áreas mais ao sul dessa Região.

Pelas médias climatológicas da ATD, mostradas na Figura 5.1d, observa-se que o comportamento da variável na área urbana e em áreas vegetadas são bastante diferentes. As maiores amplitudes são observadas em Bebedouro e em Mandacaru, chegando a quase dois graus de diferença, em relação a Petrolina, em alguns meses. Os valores mais baixos são encontrados entre os meses de janeiro e junho e os mais elevados entre julho e dezembro. Os valores médios da temperatura máxima do ar (Figura 5.1e) são bem próximos nas três localidades e os meses de outubro a janeiro registram as temperaturas mais elevadas, enquanto que junho e julho (inverno no Hemisfério Sul) são registradas as temperaturas mais baixas. Em relação às temperaturas mínimas (Figura 5.1f), é importante destacar a diferença observada nas três localidades. Os valores observados em Petrolina são substancialmente mais altos, independentemente do período do ano. Em parte essa diferença pode ser explicada como sendo um efeito da urbanização, devido à presença do asfalto e construções civis que contribuem para a retenção de calor, como também dificulta o deslocamento do vento, elevando as temperaturas nos níveis mais baixos da atmosfera. Os valores da temperatura mínima em Bebedouro e em Mandacaru refletem o comportamento de localidades com maior extensão de áreas vegetadas, resfriando-se mais durante o período noturno, devido à absorção e retenção de calor (albedo), transpiração das plantas e evaporação da água do solo, percolação da água, refletindo o efeito

da expansão agrícola. Esse comportamento explica os valores mais baixos da ATD observado em Petrolina, já que as temperaturas máximas são bem próximas nas três localidades.

## **5.2 – Análise Estatística Exploratória com o Uso do Boxplot**

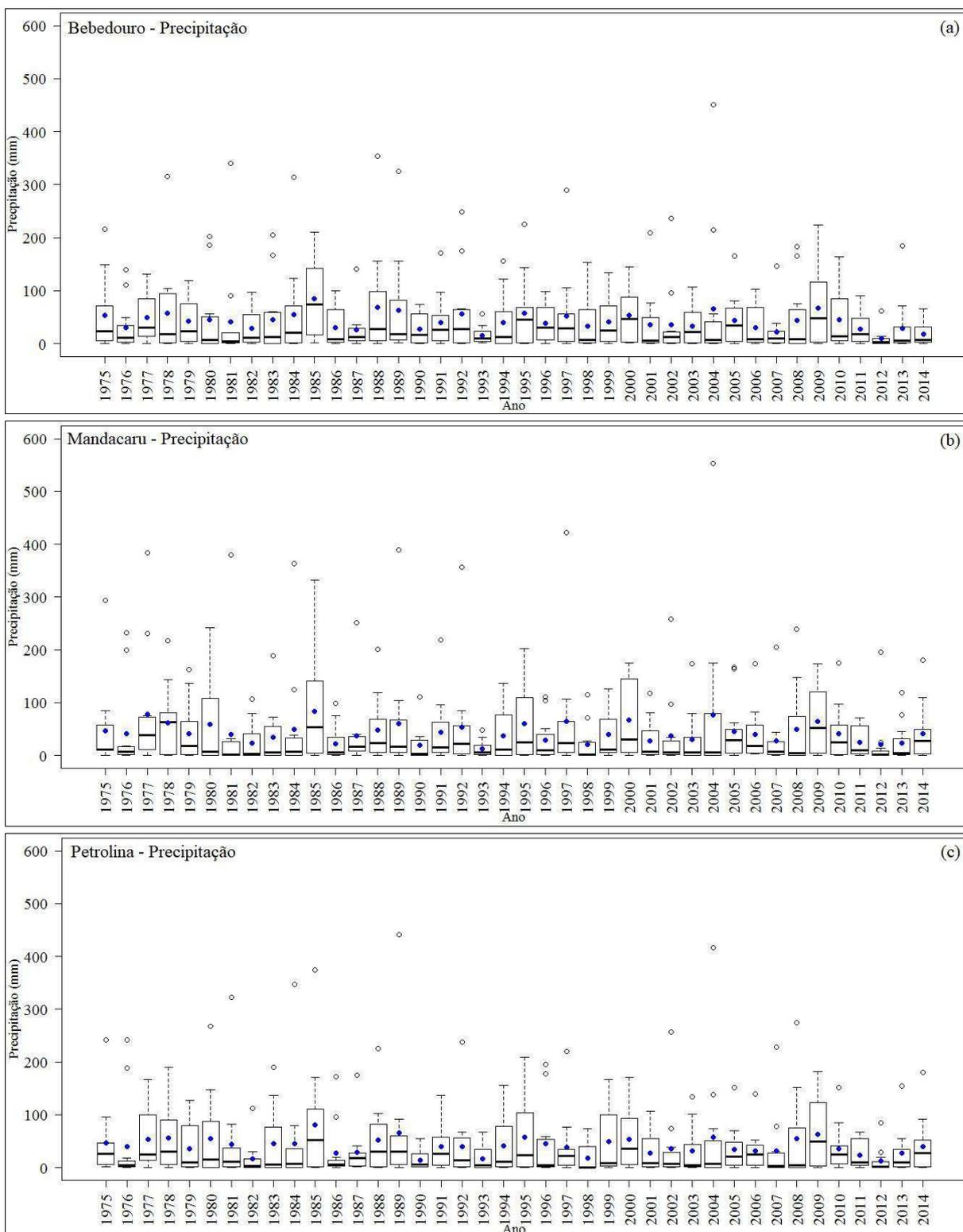
Em pesquisas realizadas a partir de dados coletados em estações meteorológicas ou climatológicas, a análise estatística exploratória ou descritiva deve sempre representar a fase inicial do estudo em questão. Efetivamente, constituem métodos que permitem organizar e descrever aspectos fundamentais de um conjunto de características observadas e/ou comparar características de dois ou mais conjuntos. No contexto dessa pesquisa a utilização de gráficos de caixas (*boxplot*) foi a ferramenta mais adequada para atingir os objetivos propostos.

### **5.2.1 – Precipitação**

A variabilidade mensal da precipitação (*boxplot*) para Bebedouro, Mandacaru e Petrolina ao longo dos anos no período de 1975 a 2014 é apresentada na Figura 5.2.

Observa-se a presença de valores discrepantes (*outliers*) em praticamente todos os anos nas três localidades analisadas. Ponderando que as séries utilizadas passaram por consistência (preenchimento de falhas) e revisão dos dados, esses dados foram mantidos nas análises e utilizados como indicadores de eventos extremos de precipitação. A chuva na região do Submédio São Francisco é predominantemente convectiva e em condições sinóticas favoráveis, convecção profunda com registros de chuvas intensas é um fenômeno cada vez mais frequente na região (GURJÃO *et al.*, 2012).

O impacto dos fenômenos El-Niño e La-Niña na precipitação do Submédio São Francisco também é perceptível nessa análise. Esses fenômenos provocam alterações no regime de chuvas da região. Os episódios quentes em geral causam redução das chuvas. Na área de estudo, o impacto foi mais evidente nos episódios: 1976-1977; 1982-1983; 1986-1987; 1990-1991; 1997-1998 e 2002-2003. Porém, mesmo na ausência do El-Niño podem ocorrer reduções significativas das chuvas. Em episódios de La-Niña tem-se, em geral, o comportamento inverso. Em média, observa-se um aumento no volume das chuvas na região (GURJÃO *et al.*, 2012). Essa relação não foi tão evidente nos dados analisados. Entretanto, dois resultados obtidos com os gráficos do *boxplot* são indicativos de condições extremas de chuva. Os anos de 2004 e 2007 se destacaram por episódios extremos de chuva na região com fortes impactos do ponto de vista hidrológico.



**Figura 5.2** – Boxplot da precipitação anual (mm): (a) Bebedouro-PE; (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.

Valores extremamente altos de chuva são observados em 2004 nas três localidades (Bebedouro, Mandacaru e Petrolina) e classificados como *outlier* (Figura 5.2a,b,c). As chuvas

bem acima da média histórica ocorreram no mês de janeiro e foram causadas pela atuação de VCAN. Neste caso específico, a área de convecção ativa associada com o VCAN teve influência direta na região de estudo, causando alto índices pluviométricos (CORREIA *et al.*, 2012, LYRA e ARRAUT, 2020). Foram registrados totais pluviométricos da ordem de 451,3 mm de chuva em Bebedouro e de, aproximadamente, 553,3 mm em Mandacaru.

No ano de 2007, a atuação do mesmo sistema atmosférico (VCAN) provocou uma redução substancial no volume de chuvas da região (Figura 5.2a,b,c). No início de 2007, alguns episódios de VCAN contribuíram de forma significativa com a redução da precipitação (INPE/CPTEC, 2007; GURJÃO *et al.*, 2012). A subsidência na área central do sistema inibiu o desenvolvimento de nuvens convectivas e precipitação em várias localidades da região.

O NEB tem uma vulnerabilidade à ocorrência de extremos de variabilidade climática interanual e as previsões dos cenários de mudanças climáticas globais e regionais sinalizam, para o próximo século, um déficit de chuvas e aumento da aridez (FRANCHITO *et al.*, 2014; MARENGO e BERNASCONI, 2015; VIEIRA *et al.*, 2015). A combinação de fatores como a variabilidade da precipitação, degradação do solo e desertificação podem tornar esta região uma das mais vulneráveis do mundo às mudanças climáticas (IPCC 2012, 2014).

É importante ressaltar que os déficits de chuva previstos para a região, a longo prazo, em conjunto com o aumento da temperatura e mais eventos de seca e estiagens podem degradar ainda mais o meio ambiente. O risco de desertificação pode ser aumentado pela possível aridificação na região em conjunto com a deterioração do meio ambiente por meio de práticas não sustentáveis de uso da terra (MARENGO *et al.*, 2016).

Marengo *et al.* (2016) resumiu as secas registradas no NEB a partir de vários autores e, para o período de estudo desta pesquisa, podemos destacar as de 1976, 1979–1981, 1982–1983, 1992–1993, 1997–1998, 2001–2002, 2005, 2007, 2010, e 2012–2015. Os autores ainda relataram as consequências mais relevantes desses eventos para a região.

A seca de 1979-1981 levou a uma redução de mais de 70% na produção de arroz, feijão e algodão, elevando os preços desses produtos a quase 100%. Já em 1982-1983, a pecuária sofreu com uma redução de 80%, mas a agricultura na região também foi significativamente afetada. Em 1986-1987, a intensidade da seca foi menos intensa. Entre 1990 e início de 1995, ocorreu a maior seca registrada, até então, do período analisada. No ano de 1993, especificamente, houve uma seca muito severa, conectada ao menos de forma parcial com as

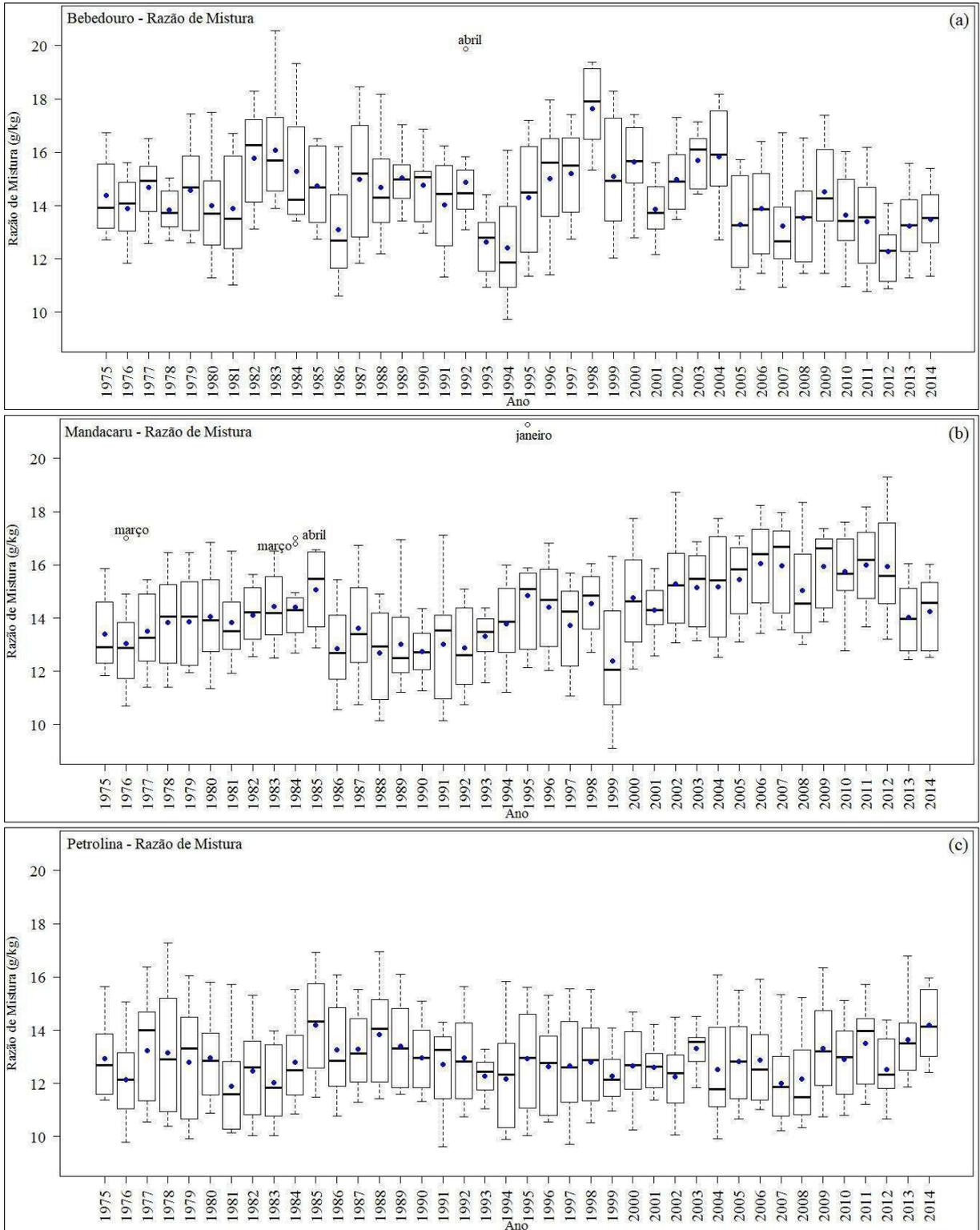
condições incomuns do ENOS durante aquele ano, como mostrado por [RAO et al. \(1995\)](#). Em 1997-1998, houve a perda de 57% da produção agrícola total da região, levando a um prejuízo econômico de cerca de 5% do PIB da região inteira e ameaçou o abastecimento local de alimentos. Em 2012 iniciava a seca que seria a mais forte desta série, atingindo sua maior intensidade em 2012-2013. De acordo com [Marengo et al. \(2013\)](#), a estação chuvosa de fevereiro a maio no NEB em 2012 foi a mais seca entre 1961 e 2012.

Em termos físicos, as anomalias de precipitação nessas regiões são influenciadas pelas mudanças na temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico tropical que se manifestam como os extremos do El Niño-Oscilação Sul (ENSO) causando mudanças na circulação de Walker com orientação zonal ([AMBRIZZI et al., 2004](#)). Porém, a variabilidade da precipitação nesta região é explicada apenas parcialmente pelo ENSO. Das secas mencionadas anteriormente, apenas as de 1998, 2008 e a de 2012 ocorreram durante os anos de ENSO. Outros eventos de seca estão diretamente relacionados a uma posição anômala ao norte da ZCIT sobre o Oceano Atlântico, devido a um norte tropical mais quente.

### **5.2.2 – Razão de Mistura (g/kg)**

A variabilidade mensal da razão de mistura (*boxplot*) para Bebedouro, Mandacaru e Petrolina ao longo dos anos no período de 1975 a 2014 é apresentada na Figura 5.3. Percebe-se que a umidade atmosférica tem um comportamento diferenciado quando comparadas as três localidades. Os valores mais baixos de  $r$  (g/kg) são observados em Petrolina. Além disso, apesar de mostrar uma dispersão relativamente alta ao longo dos anos, não são observadas grandes diferenças (tendência de aumento ou redução nos valores da mediana) ao longo da série. A grande maioria dos dados indicam valores da razão de mistura menores que 14 g/kg (Figura 5.3c) em Petrolina.

As séries de dados coletados em Bebedouro e em Mandacaru mostram padrões de comportamento diferentes. Através da amplitude interquartílica, observa-se maior dispersão dos dados em Bebedouro. Em nenhuma das localidades foram observados valores discrepantes. Um resultado relevante observado na série de Mandacaru, em termos de mediana, é a tendência crescente a partir de 1993. Uma exceção é o ano de 1999 que mostra uma queda substancial na razão de mistura.



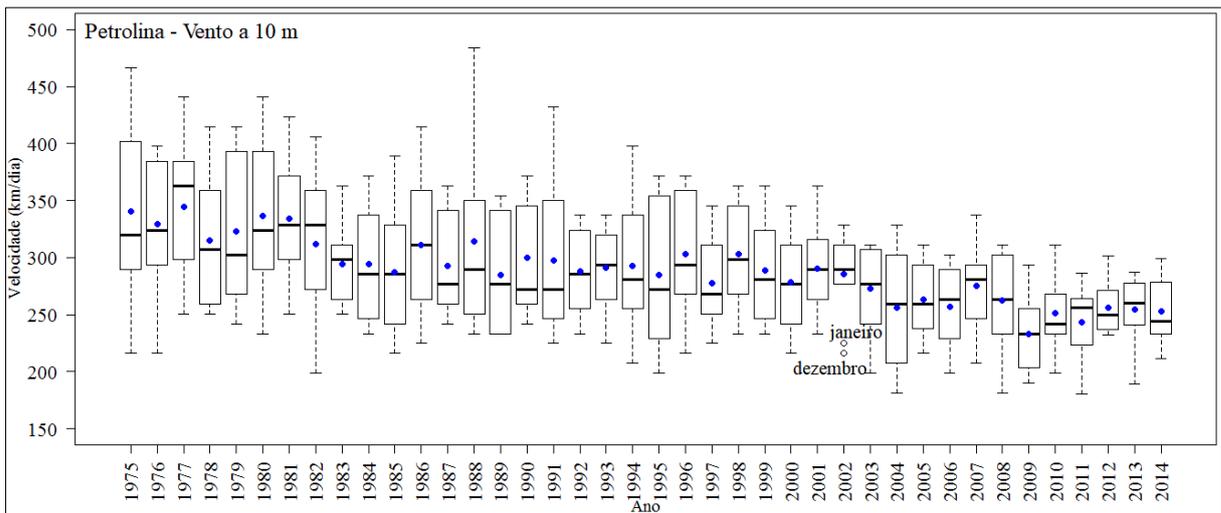
**Figura 5.3** – Boxplot da razão de mistura anual (g/kg): (a) Bebedouro-PE; (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.

Esse período, a partir de meados da década de 1990, coincide com mudanças ambientais significativas na região do polo agroindustrial Juazeiro-Petrolina. Essas alterações não

ocorreram apenas na cobertura do solo. Entre os anos de 1995 e 2000, ações governamentais (incentivos) foram substancialmente ampliadas com foco nas potencialidades da produção de frutas e vinhos, aumentando as áreas irrigadas. O processo que começou com a agricultura irrigada e estruturação dos perímetros públicos provocou também impactos ambientais negativos com práticas de manejo de solos inadequadas.

No contexto deste trabalho, entendemos que o processo de ampliação de áreas irrigadas a partir de inovações tecnológicas, possibilitou a diversificação de culturas, mudanças no balanço de energia e, conseqüentemente, no comportamento espacial dos fluxos turbulentos (calor sensível e calor latente). De acordo com [Xia Li et al. \(2017\)](#), conversões de áreas úmidas para outros tipos de uso da terra podem alterar o ciclo hidrológico e influenciar o microclima local.

### 5.2.3 – Vento



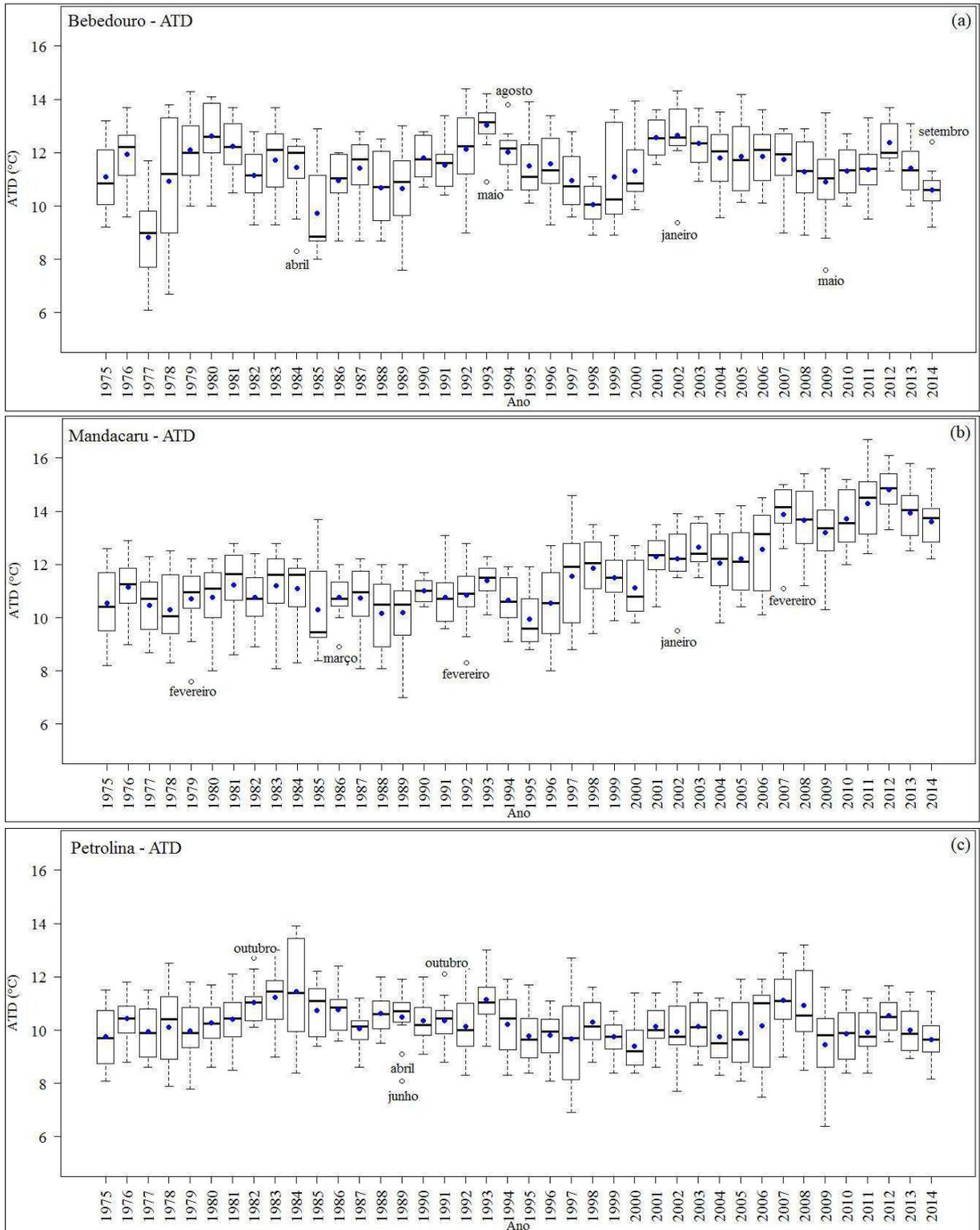
**Figura 5.4** – *Boxplot* do vento anual (km/dia) a 10 m em Petrolina-PE.

O comportamento anual do vento em Petrolina pode ser observado na Figura 5.4. É clara a tendência de redução da velocidade do vento ao longo dos anos, além de uma menor variabilidade na velocidade dentro de cada ano na segunda metade da série histórica, comparando com os primeiros anos da série de dados. Na primeira metade da série, até o ano de 1994, a maioria dos anos tiveram suas médias influenciadas pelos valores extremos positivos, ficando acima da mediana. O ano de 1988 aparece como tendo os maiores registros na velocidade média do vento. Em 2002, os meses de janeiro e dezembro tiveram valores médios discrepantes quando comparados aos demais valores observados no restante do ano. Os meses de dezembro e janeiro de 2002 também foram *outliers* observados na precipitação em

Petrolina (Figura 5.2c), com totais pluviométricos acima da média histórica, principalmente o mês de janeiro que registrou 256,4 mm, enquanto a média é de 83,1 mm.

## 5.2.4 – Amplitude Térmica Diária, Temperatura Máxima e Temperatura Mínima

### 5.2.4.1 – Amplitude Térmica Diária



**Figura 5.5 – Boxplot da ATD anual (°C): (a) Bebedouro-PE; (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.**

A Figura 5.5 mostra os *boxplots* das médias mensais da ATD para Bebedouro, Mandacaru e Petrolina. Nas três localidades foram observados valores discrepantes (*outliers*), representados por círculos, sendo menos frequente na área urbana (Petrolina). Os meses em que foram detectados esses valores atípicos também estão assinalados nas figuras. Dos 13 anos em que ocorreram *outliers*, apenas dois, 1984 e 1989, estavam sob influência do fenômeno La-Niña, enquanto os demais foram anos influenciados pelo fenômeno El-Niño (CPTEC/INPE, 2020).

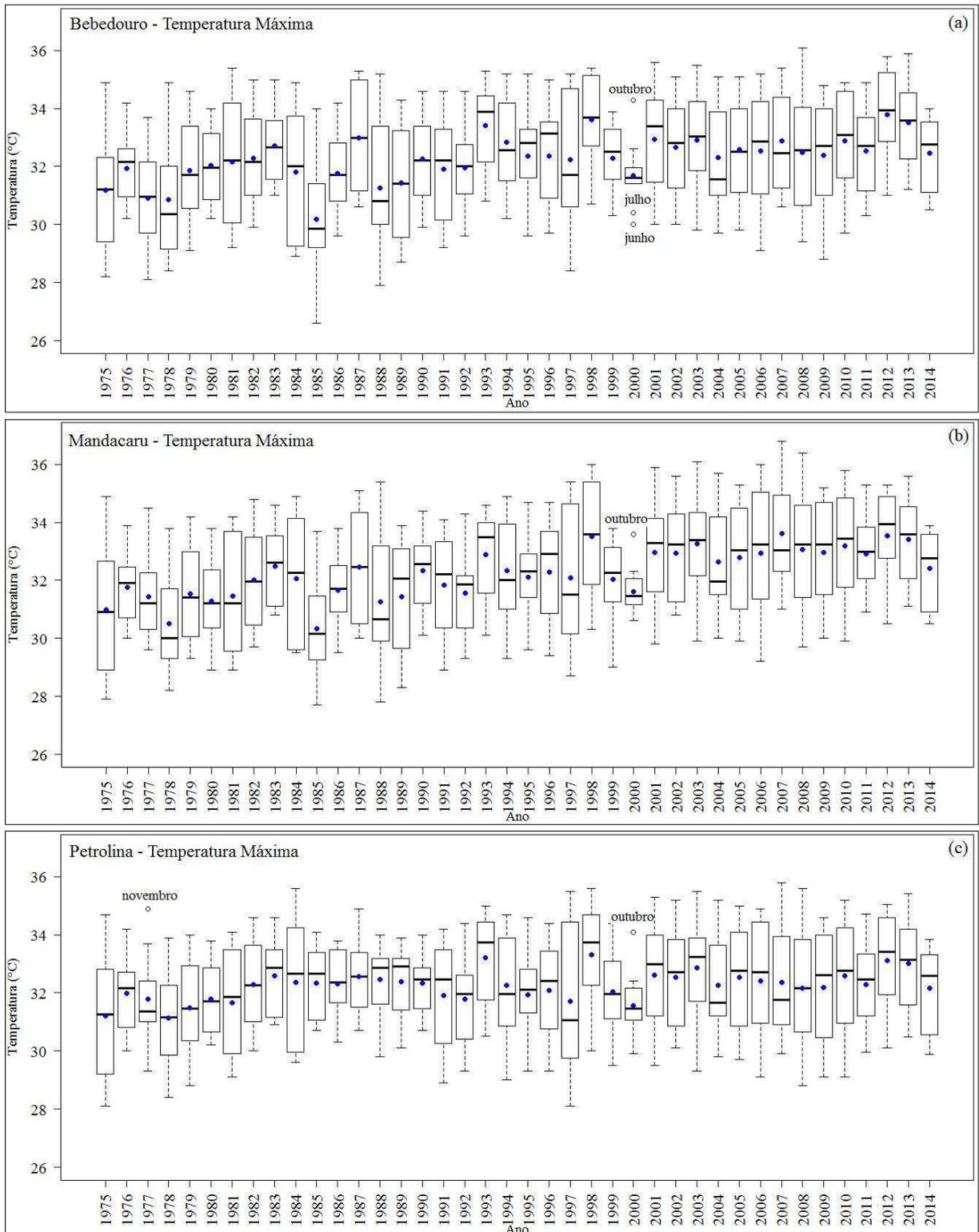
Em termos de efeitos relevantes associados com anos de El-Niño, podemos destacar o evento de 1992, detectado em Mandacaru (classificado como de forte intensidade) e o de 2009 detectado em Bebedouro (classificado como de intensidade fraca) (CPTEC/INPE, 2020). Nos dois casos foram registradas chuvas acima da média. Esse resultado é aparentemente inconsistente se considerado que, em geral, existe uma relação do tipo causa-efeito observada na maioria dos episódios de El-Niño. De forma generalizada, considera-se que em anos de El-Niño tem-se redução no volume das chuvas na região Nordeste do Brasil.

A Figura 5.5b apresenta a variação da ATD ao longo dos anos entre 1975 e 2014 em Mandacaru, mostrando um crescimento considerável a partir de 1996. Esse comportamento é semelhante ao observado na razão de mistura também em Mandacaru (Figura 5.3b). Uma diferença importante na análise da ATD é o surgimento de valores atípicos (*outliers*), anormalmente baixos, observados nos anos de 1979, 1986, 1992, 2002 e 2007 em meses do período chuvoso. Outro resultado igualmente relevante é o comportamento inverso da ATD no período entre os anos de 1994 e 2000. Nota-se, uma redução da ATD em Mandacaru e um aumento em Bebedouro (Fig. 5.5a). A redução da ATD entre 1994 e 2000 também é visível na série de Petrolina (Fig. 5.5c).

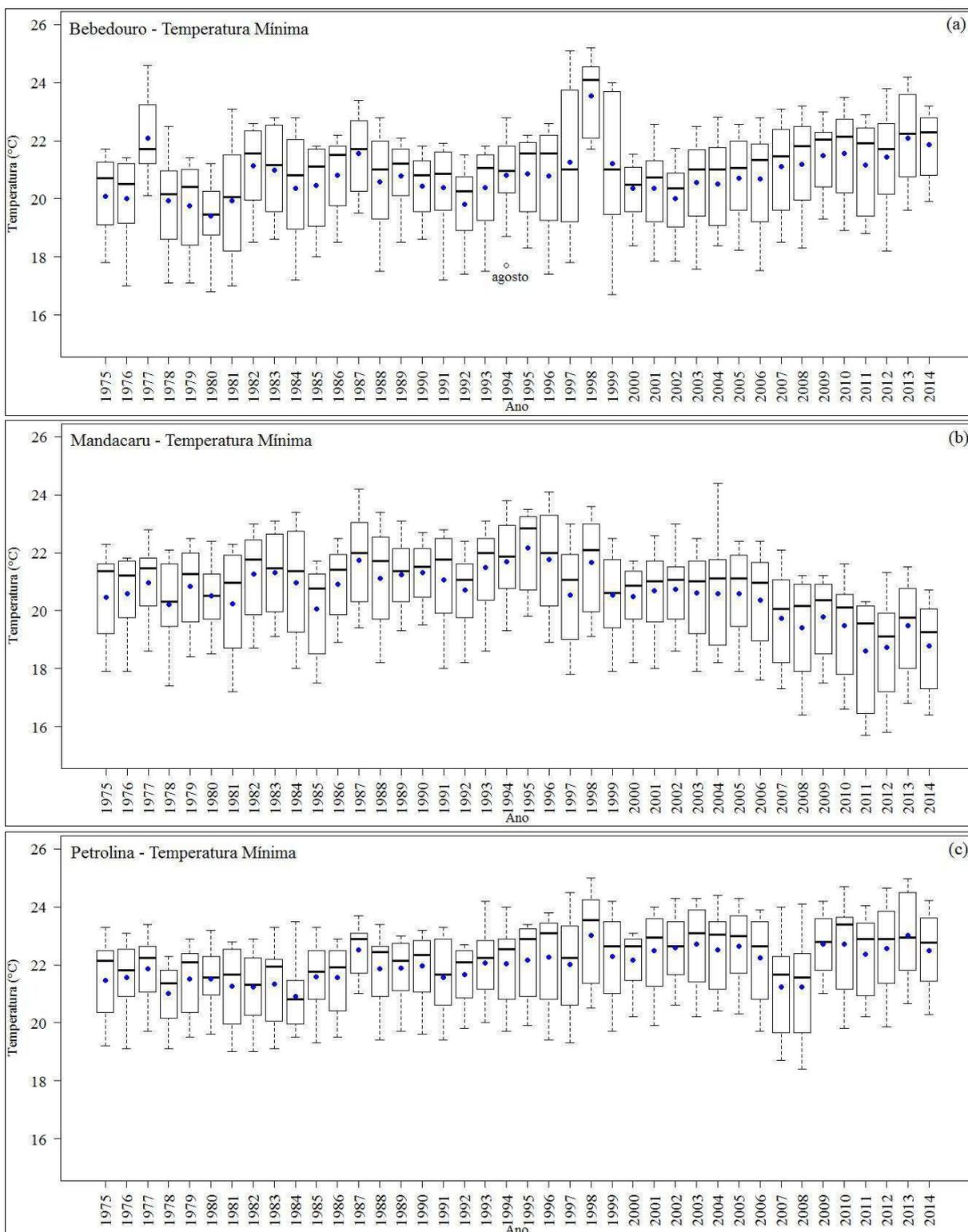
A videira é particularmente sensível às mudanças climáticas. No vale do São Francisco, há um interesse particular na busca de uma maior compreensão sobre variações do clima e impactos na qualidade das uvas. A variável ATD além de ser normalmente utilizada em estudos sobre aquecimento global representa um parâmetro importante em atividades agrícolas, em função da relação entre condições microclimáticas e produtividade das frutas cultivadas na região de estudo.

### 5.2.4.2 – Temperatura Máxima e Temperatura Mínima

As Figuras 5.6 e 5.7 mostram o comportamento da temperatura máxima e da temperatura mínima para Bebedouro, Mandacaru e Petrolina, através do *boxplot*. A diferença entre essas duas temperaturas é a ATD observada na Figura anterior.



**Figura 5.6** – *Boxplot* da temperatura máxima do ar anual (°C): (a) Bebedouro-PE; (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.



**Figura 5.7** – *Boxplot* da temperatura mínima do ar anual (°C): (a) Bebedouro-PE; (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.

Em relação ao comportamento das temperaturas máxima e mínima em Bebedouro (Figuras 5.6a e 5.7a), observa-se uma tendência de aumento ao longo do tempo. Podemos

destacar o ano de 1985, em que ocorreram os menores valores de temperatura máxima, o ano de 1998, com valores mais elevados da temperatura mínima, registrado no mês de novembro e o ano de 2000, único ano em que foram observados *outliers* na temperatura máxima e uma pequena variação de temperatura nos outros meses. O ano de 1985 é já bem conhecido pelas fortes chuvas que ocorreram na região do Vale de São Francisco, principalmente nos meses de janeiro, quando há uma maior ocorrência de VCAN e em abril, quando um sistema frontal atingiu as latitudes mais baixas e, juntamente com a influência da ZCIT, propiciou o registro dos elevados valores de precipitação (CORREIA *et al.*, 2006a).

Em Mandacaru, na Figura 5.5b, verifica-se que a amplitude interquartílica é pequena na maioria dos anos do *boxplot* da ATD. Esse resultado indica uma menor dispersão na parte central da amostra. O mesmo não acontece com a temperatura máxima (Figura 5.6b) e temperatura mínima (Figura 5.7b), em que a grande dispersão nos dados é visível nos dois casos. A tendência de aumento na temperatura máxima e de redução na temperatura mínima resulta em valores altos da ATD, principalmente notável a partir do ano 2000.

O período prolongado de estiagem, que atingiu a área de estudo a partir de 2012 (2012-2016), trouxe impactos ambientais negativos, principalmente no desenvolvimento de práticas agrícolas nessa região. Esse fenômeno de seca severa, em parte, explica as mudanças no padrão de variabilidade das temperaturas máxima e mínimas e, conseqüentemente, na ATD observado nos *boxplots*. Portanto, esse período crítico, no contexto de mudanças ambientais, representa um dos fatores importantes, tanto para o aumento na temperatura máxima quanto para diminuição da temperatura mínima, facilmente detectável nos *boxplots* elaborados para Mandacaru (Figuras 5.6b e 5.7b).

Em Petrolina, o comportamento visto na temperatura máxima (Figura 5.6c) e temperatura mínima (Figura 5.7c), ambas com tendência de aumento ao longo da série histórica, faz com que seja observada pouca variabilidade na ATD.

Para a agricultura, mudanças no comportamento padrão da ATD podem influenciar diretamente o desenvolvimento das culturas, tendo em vista que cada espécie tem sua particularidade em relação à amplitude térmica. Em Mandacaru foi observada uma tendência de amplitudes térmicas mais elevadas com o passar dos anos e esse comportamento pode ser favorável à produção de vinho, já que essas características da temperatura influenciam positivamente em substâncias que melhoram a qualidade do vinho produzido (VALE, 2016).

Dada a importância da ATD para a agricultura, as diferenças encontradas entre as três estações devem ser observadas com atenção, já que mesmo estações tão próximas geograficamente, podem apresentar comportamentos distintos nas temperaturas, condicionadas à concentração de umidade na atmosfera, transporte dessa umidade pelo vento e tipo de cobertura do solo presente. Para estudos climatológicos, dependendo da região analisada, a variável ATD pode não ser um bom indicador, porém, para o desenvolvimento da agricultura, ela continua sendo muito relevante.

### 5.3 – Sensoriamento Remoto

#### Crescimento Urbano e Expansão de Áreas Agrícolas

Dados disponíveis no Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), permitiu acompanhar indicadores do desenvolvimento populacional nas cidades de Petrolina e Juazeiro. Na Tabela 5.1, são apresentados os dados do crescimento populacional das duas cidades, correspondente ao período de 1970 a 2010. Em 1970, a população das duas cidades, era praticamente a mesma, considerando a ocupação das áreas urbana e rural.

Na década de 1970, houve um crescimento maior na população total de Juazeiro e na população rural, quando comparado com o município de Petrolina que, por sua vez, apresentou um crescimento maior na população urbana. A partir da década de 1980, percebe-se um desenvolvimento maior em Petrolina, tanto na população urbana quanto na rural, chegando a uma diferença de quase 100 mil habitantes em relação a Juazeiro, de acordo com o CENSO de 2010.

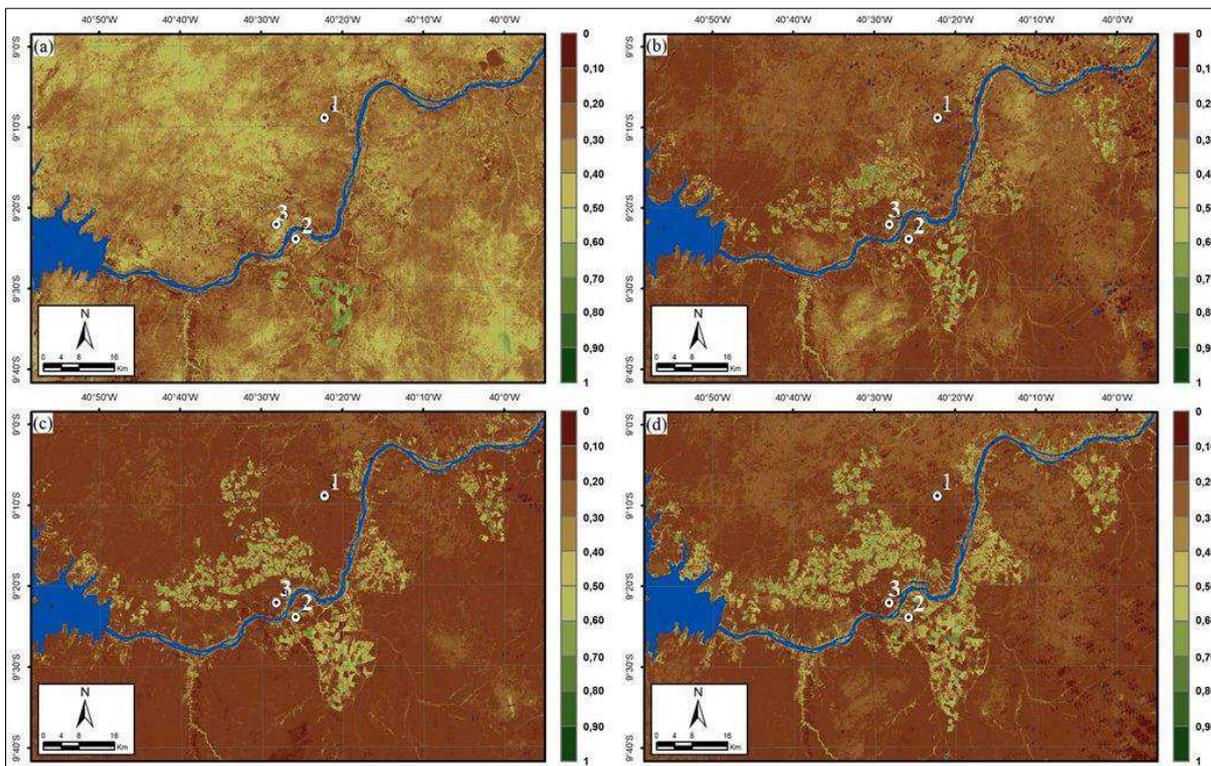
**Tabela 5.1** – Crescimento populacional das cidades de Petrolina-PE e Juazeiro-BA.

<b>Petrolina-PE</b>	<b>1970</b>	<b>1980</b>	<b>1991</b>	<b>2000</b>	<b>2010</b>
<b>Urbana</b>	38.189	74.828	125.273	166.279	219.172
<b>Rural</b>	23.063	29.469	50.133	52.259	74.790
<b>Total</b>	61.252	104.297	175.406	218.538	293.962
<b>Juazeiro-BA</b>	<b>1970</b>	<b>1980</b>	<b>1991</b>	<b>2000</b>	<b>2010</b>
<b>Urbana</b>	39.083	64.323	102.266	133.278	160.775
<b>Rural</b>	22.565	53.852	26.501	41.289	37.190
<b>Total</b>	61.648	118.175	128.767	174.567	197.965

Fonte: IBGE – Censo Demográfico.

A Figura 5.8 mostra a expansão de áreas irrigadas a partir de quatro imagens classificadas de IVDN, em meses do período seco, para evidenciar o efeito da irrigação nas regiões destacadas. Os pontos 1, 2 e 3 apresentados nas imagens indicam a localização

geográfica das estações de Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE, respectivamente. As áreas em tons de verde correspondem às áreas vegetadas, com valores de IVDN acima de 0,40, as tonalidades entre 0,01 e 0,40 correspondem a áreas de solo exposto e aglomerados urbanos e, as regiões na cor azul representa o Rio São Francisco (água).



**Figura 5.8** – Imagens classificadas da área em estudo, demonstrando a dinâmica da ocupação das áreas irrigadas nos dias: (a) 24/06/1987; (b) 17/08/1995; (c) 24/09/2003 e (d) 29/08/2011. Fonte: O autor.

Resultados de um estudo realizado também com base em imagens de Sensoriamento Remoto para avaliar a expansão de áreas irrigadas no Polo Juazeiro-Petrolina (SÁ *et al.*, 2007) indicam um aumento de 47,19% no período entre 1986 e 2006. Os autores ressaltam, entretanto, que a maior alteração na cobertura do solo ocorreu na década de 1986 a 1996.

Alterações na cobertura e no uso da terra podem alterar substancialmente o balanço de energia em superfície e, conseqüentemente, a transferência de água para atmosfera (CORREIA *et al.*, 2006a). Mudanças climáticas em escala regional são indicativos de impactos ambientais e exigem investigações científicas mais aprofundadas. Essa característica constitui uma das motivações dessa pesquisa.

O aumento da área irrigada observada em Mandacaru ao longo das décadas contribuiu para o aumento na umidade atmosférica, como mencionado anteriormente na análise dos dados com o uso do *boxplot*. Com a expansão da área urbana em Petrolina e das áreas agrícolas, no período posterior a instalação da usina hidrelétrica de Sobradinho, essa região teve grandes transformações no meio urbano e rural e isto motivou a reestruturação do espaço agrário.

Características distintas na cobertura do solo em Petrolina e em Juazeiro, com diferenças no teor de umidade nos baixos níveis da atmosfera, na temperatura do ar e, conseqüentemente, na pressão atmosférica, são fatores que contribuem para o desenvolvimento de circulações termicamente induzidas do tipo brisa, no sentido Juazeiro-Petrolina, advectando umidade de áreas vegetadas para a área urbana. [Silva et al. \(2011\)](#) observaram que as extensas áreas agrícolas nas proximidades de Petrolina, gerou um contraste na temperatura entre as duas localidades, o que caracterizou a formação da ilha de calor urbana (ICU) em Petrolina e causaram mudanças nas circulações locais.

[Araújo e Silva \(2013\)](#) também observaram um padrão de comportamento semelhante em Mandacaru, em um estudo sobre a influência do polo frutícola Petrolina/Juazeiro na economia da região. Os autores verificaram que, em decorrência de grandes investimentos na agricultura irrigada na década de 1990, a produção de manga e uva no ano de 1995 já era superior à produção dos anos 1980, que foi um período de grande crescimento na produção agrícola em todo o Vale do Rio São Francisco.

**Tabela 5.2** – Área equipada para irrigação na Região Nordeste.

Região/UF	1960	1970	1975	1980	1985	1996	2006	2015
<b>Nordeste</b>	<b>51.770</b>	<b>115.971</b>	<b>163.358</b>	<b>261.425</b>	<b>366.832</b>	<b>751.886</b>	<b>1.007.657</b>	<b>1.171.159</b>
AL	5.610	13.218	18.643	12.410	27.814	156.992	195.764	185.717
BA	22.102	27.042	41.007	70.603	107.055	209.705	312.668	504.781
CE	11.389	25.484	29.887	63.599	67.305	108.998	117.381	70.449
MA	74	1.820	524	2.037	24.035	16.521	64.059	84.575
PB	3.439	13.433	18.227	18.085	18.895	63.548	58.683	59.357
PE	6.265	19.002	34.553	65.039	83.457	118.400	152.917	146.169
PI	451	1.863	1.944	6.387	13.560	18.254	30.948	32.266
RN	1.383	5.471	7.896	15.418	17.589	45.778	54.716	57.999
SE	1.057	8.639	10.678	7.846	7.122	13.691	20.521	29.845

Fonte: modificado de [ANA \(2017\)](#).

Dados do [Censo Agropecuário do IBGE \(2006\)](#) e da [ANA \(2017\)](#) ajudam a compreender melhor o que foi observado nas imagens de sensoriamento remoto. De acordo com essas informações, a área irrigada no Brasil tem crescido mais de 4% ao ano, desde a década de 1960. Na Tabela 5.2, nota-se um expressivo crescimento da irrigação no Estado da Bahia, mais

especificamente a partir de meados da década de 1990, comparando com os demais Estados da Região Nordeste. Em um estudo realizado por [Silva Paz, et al. \(2003\)](#), utilizando dados da Secretaria da Agricultura do Estado da Bahia os resultados semelhantes. Os autores mostraram que, na década de 1990, a agricultura irrigada no Estado da Bahia teve crescimento significativo.

## **5.4 – Análise Estatística**

### **5.4.1 – Análise de Regressão**

A abordagem usada nesta pesquisa requer não apenas investigar a tendência das variáveis e parâmetros atmosféricos a partir da análise das séries históricas de Bebedouro, Mandacaru e Petrolina, mas também investigar a consistência dos resultados obtidos por meio de diferentes testes de significância. Nesta seção são apresentados os resultados obtidos por meio de regressão linear simples. Uma das principais formas de manifestação da não estacionariedade em séries hidrológicas são as tendências lineares ([MILLÉO et al., 2015](#)).

#### **5.4.1.1 – Precipitação**

Os valores dos coeficientes angular e valor-P para precipitação em Bebedouro, Mandacaru e Petrolina são apresentados na Tabela 5.3. Observa-se que, em Bebedouro, a maior parte das séries indicam tendência negativa, ou seja, uma redução dos totais de precipitação ao longo dos anos, exceto nos meses de maio, outubro e dezembro que apresentaram uma tendência positiva, entre os anos de 1975 e 2014. No entanto, verifica-se que essas tendências não foram estatisticamente significativas ao nível de 95%. Nota-se que o mês de março apresentou a maior taxa negativa, com redução média de -2,49 mm/ano.

Em Mandacaru, a maioria das séries analisadas também indicam tendência negativa na precipitação. Apenas as séries temporais dos meses de abril, julho, agosto e outubro tiveram um aumento nos totais de precipitação registrados. Nenhuma das tendências observadas foram estatisticamente significativas ao nível de 95%. Observa-se ainda que para Mandacaru, que o mês de março também apresentou a maior taxa negativa de precipitação de -2,26 mm/ano.

Comportamento semelhante foi observado em Petrolina. A maioria das séries temporais analisadas indica tendência negativa. Tendências positivas foram observadas nas séries de abril, julho, agosto, outubro e dezembro. Porém, nenhum aumento ou redução foi estatisticamente significativo. As maiores taxas negativas foram observadas nas séries com as séries das médias

anuais e do período chuvoso (novembro a abril), com -3,78 mm/ano e -3,61 mm/ano, respectivamente.

**Tabela 5.3** – Análise de regressão aplicada à precipitação (mm) em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE

Período	Precipitação					
	$\alpha = 0,05$					
	Bebedouro		Mandacaru		Petrolina	
	C. Ang.	Valor P	C. Ang.	Valor P	C. Ang.	Valor P
<b>Janeiro</b>	-0,2986	0,8104	-0,0476	0,9761	-0,7049	0,5923
<b>Fevereiro</b>	-1,0218	0,2977	-0,1084	0,9169	-0,6490	0,5335
<b>Março</b>	-2,4873	0,0554	-2,2562	0,1305	-1,9351	0,1171
<b>Abril</b>	-0,1386	0,8559	0,3099	0,6727	0,4705	0,4829
<b>Mai</b>	0,0431	0,9073	-0,5707	0,1552	-0,3248	0,3236
<b>Junho</b>	-0,0902	0,6224	-0,0685	0,6422	-0,0829	0,6532
<b>Julho</b>	-0,1853	0,2414	0,1144	0,3277	0,0066	0,9543
<b>Agosto</b>	-0,0062	0,9345	0,0449	0,1770	0,0055	0,9316
<b>Setembro</b>	-0,1950	0,0784	-0,1361	0,0802	-0,0686	0,3454
<b>Outubro</b>	0,0332	0,9105	0,3791	0,1707	0,2883	0,2904
<b>Novembro</b>	-0,6427	0,2262	-0,9670	0,1432	-0,9146	0,1847
<b>Dezembro</b>	0,1826	0,8407	-0,8245	0,5042	0,1273	0,9038
<b>Anual</b>	-0,4006	0,0661	-0,3442	0,1544	-3,7818	0,1333
<b>Chuvoso</b>	-0,7344	0,0629	-0,6489	0,1416	-3,6058	0,1260
<b>Seco</b>	-0,0667	0,4796	-0,0395	0,6934	-0,1760	0,7551

#### 5.4.1.2 – Razão de Mistura (g/kg)

A razão de mistura foi utilizada neste estudo como parâmetro representativo da umidade presente nos baixos níveis da atmosfera. A partir dos resultados referentes à razão de mistura (g/kg) apresentados na Tabela 5.4, observa-se que, em Bebedouro, todas as séries indicam tendências negativas não significativa a 95%. Por outro lado, todas as séries de Mandacaru apresentam uma tendência de aumento significativo no teor de umidade na atmosfera.

Em Petrolina, alguns períodos mostraram tendência positiva e outros, tendência negativa, porém nenhum com significância estatística. Vale lembrar que Petrolina representa uma área urbana, enquanto Bebedouro e Mandacaru representam áreas vegetadas, o que torna este resultado esperado, devido às estruturas físicas de uma cidade, como asfalto e concreto, reduzindo a transferência de umidade da superfície para atmosfera.

**Tabela 5.4** – Análise de regressão aplicada à razão de mistura (g/kg) em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE.

Período	Razão de Mistura					
	$\alpha = 0,05$					
	Bebedouro		Mandacaru		Petrolina	
	C. Ang.	Valor P	C. Ang.	Valor P	C. Ang.	Valor P
<b>Janeiro</b>	-0,0417	0,1177	0,0633	0,0085	-0,0003	0,9881
<b>Fevereiro</b>	-0,0316	0,1010	0,0479	0,0204	-0,0243	0,0930
<b>Março</b>	-0,0218	0,2444	0,0427	0,0350	-0,0158	0,3219
<b>Abril</b>	-0,0153	0,4921	0,0448	0,0124	-0,0170	0,3208
<b>Mai</b>	-0,0043	0,8304	0,0647	0,0024	0,0026	0,8510
<b>Junho</b>	-0,0187	0,2888	0,0338	0,0289	0,0030	0,7833
<b>Julho</b>	-0,0118	0,5476	0,0549	0,0014	0,0095	0,3543
<b>Agosto</b>	-0,0294	0,0922	0,0537	0,0000	0,0120	0,2634
<b>Setembro</b>	-0,0324	0,1706	0,0418	0,0024	0,0099	0,3459
<b>Outubro</b>	-0,0127	0,4851	0,0727	0,0003	0,0237	0,1112
<b>Novembro</b>	-0,0197	0,3899	0,0857	0,0000	0,0191	0,2446
<b>Dezembro</b>	-0,0259	0,2124	0,0685	0,0001	0,0262	0,1196
<b>Anual</b>	-0,0221	0,1426	0,0562	0,0000	0,0041	0,6054
<b>Chuvoso</b>	-0,0260	0,0935	0,0588	0,0000	-0,0020	0,8327
<b>Seco</b>	-0,0182	0,2659	0,0536	0,0001	0,0101	0,2371

Um resultado relevante dessa análise é a diferença no comportamento da variável razão de mistura nas estações de Bebedouro e Mandacaru. Apesar de ambas estarem localizadas em áreas vegetadas, apresentam um comportamento inverso. Isso significa que não é suficiente apenas a distinção por ser área rurais ou urbana. Uma análise mais detalhada sobre esse efeito é apresentada posteriormente. Dados de imagens de sensoriamento remoto apresentados na seção anterior, mostram que a área vegetada em Mandacaru e ao seu redor é bem superior à observada em Bebedouro. Essa característica tem influência direta nos fluxos turbulentos (fluxo de calor latente mais alto) contribuindo com uma maior taxa de vapor d'água liberado para a atmosfera a partir do processo de evapotranspiração. Comparando as taxas de aumento/redução da umidade, os maiores valores, em módulo, são observados em Mandacaru e em Bebedouro.

#### 5.4.1.3 – Vento

O vento é uma variável muito importante em estudos climatológicos, já que está diretamente relacionada com a advecção (transporte) de umidade e calor. Os dados de vento utilizados foram os da estação de Petrolina, já que era a única série que apresentava o vento a

10 metros de altura, geralmente usado para estudos climatológicos. As séries de Bebedouro e de Mandacaru apresentam dados de vento a 2 metros de altura, o que é mais utilizado em estudos relacionados à agricultura. Os resultados da análise de regressão mostraram tendências negativas significativas para velocidade do vento a 95%. Os meses do período seco foram os que apresentaram as maiores taxas negativas registradas (Tabela 5.5).

**Tabela 5.5** – Análise de regressão aplicada ao vento (km/dia) em Petrolina-PE.

Período	Vento					
	$\alpha = 0,05$					
	Bebedouro		Mandacaru		Petrolina	
	C. Ang.	Valor P	C. Ang.	Valor P	C. Ang.	Valor P
<b>Janeiro</b>	-	-	-	-	-1,7579	0,0001
<b>Fevereiro</b>	-	-	-	-	-1,0856	0,0233
<b>Março</b>	-	-	-	-	-1,3482	0,0009
<b>Abril</b>	-	-	-	-	-1,5606	0,0001
<b>Mai</b>	-	-	-	-	-2,0501	0,0000
<b>Junho</b>	-	-	-	-	-2,5823	0,0000
<b>Julho</b>	-	-	-	-	-3,5413	0,0000
<b>Agosto</b>	-	-	-	-	-3,3446	0,0000
<b>Setembro</b>	-	-	-	-	-3,1101	0,0000
<b>Outubro</b>	-	-	-	-	-2,3436	0,0000
<b>Novembro</b>	-	-	-	-	-1,7804	0,0000
<b>Dezembro</b>	-	-	-	-	-1,4417	0,0001
<b>Anual</b>	-	-	-	-	-2,1622	0,0000
<b>Chuvoso</b>	-	-	-	-	-1,4957	0,0000
<b>Seco</b>	-	-	-	-	-2,8287	0,0000

No estudo de [Melo et al. \(2013\)](#) foi observado que as circulações locais em Petrolina são relativamente mais fortes no período seco e mais fracas no período de janeiro a maio. A redução na velocidade do vento observada nas séries do período seco, pode ter relação direta com circulações induzidas termicamente nas proximidades de Petrolina, com sentido oposto ao predominante dos alísios de sudeste, diminuindo a velocidade resultante do vento.

#### 5.4.1.4 – Amplitude Térmica Diária (ATD)

Para a ATD, em Bebedouro, os resultados indicam tendência negativa para os meses de maio e agosto, e os demais períodos com tendência positiva, porém, nenhum com significância estatística ao nível de 95%. Por outro lado, em Mandacaru, todas as séries apresentaram uma

tendência positiva, significativas. Já em Petrolina, alguns meses (janeiro, fevereiro e setembro) tiveram uma tendência positiva, sem significância estatística. Já os meses de março, maio e agosto indicaram tendência negativa significativa (Tabela 5.6).

**Tabela 5.6** – Análise de regressão aplicada à ATD (°C) em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE.

Período	ATD					
	$\alpha = 0,05$					
	Bebedouro		Mandacaru		Petrolina	
	C. Ang.	Valor P	C. Ang.	Valor P	C. Ang.	Valor P
<b>Janeiro</b>	0,0199	0,2475	0,0990	0,0000	0,0032	0,8283
<b>Fevereiro</b>	0,0302	0,1174	0,1081	0,0000	0,0067	0,6612
<b>Março</b>	0,0158	0,3396	0,1014	0,0000	-0,0285	0,0203
<b>Abril</b>	0,0129	0,4879	0,1038	0,0000	-0,0234	0,1156
<b>Maio</b>	-0,0102	0,5914	0,0806	0,0000	-0,0281	0,0500
<b>Junho</b>	0,0153	0,3968	0,0909	0,0000	-0,0156	0,1394
<b>Julho</b>	0,0066	0,7110	0,0893	0,0000	-0,0161	0,0951
<b>Agosto</b>	-0,0001	0,9953	0,0754	0,0000	-0,0185	0,0364
<b>Setembro</b>	0,0199	0,1380	0,1122	0,0000	0,0038	0,6682
<b>Outubro</b>	0,0095	0,5541	0,0954	0,0000	-0,0089	0,4331
<b>Novembro</b>	0,0020	0,8896	0,0897	0,0000	-0,0050	0,7223
<b>Dezembro</b>	0,0062	0,7523	0,0879	0,0000	-0,0227	0,0588
<b>Anual</b>	0,0107	0,3496	0,0945	0,0000	-0,0128	0,0645
<b>Chuvoso</b>	0,0145	0,1984	0,0983	0,0000	-0,0116	0,1673
<b>Seco</b>	0,0068	0,6051	0,0906	0,0000	-0,0139	0,0513

Como a ATD é a diferença entre as temperaturas máxima e mínima diárias, o seu resultado está diretamente ligado ao comportamento dessas duas variáveis e, por isso, pode resultar em resultados semelhantes, por razões distintas. Principalmente em Mandacaru, as tendências significativas opostas nas temperaturas máxima e mínima, resultaram em uma tendência forte de aumento nos valores da ATD, chegando a taxas de até 0,1 °C/ano.

#### 5.4.1.5 – Temperatura Máxima do Ar

São observadas tendências positivas significativas a 95% nas três localidades (Tabela 5.7). Em Bebedouro, apenas os meses de maio, novembro e dezembro não apresentaram significância estatística. Por sua vez, em Mandacaru, todas as séries mostram tendência positiva

significativa ao nível de 95%. Já em Petrolina, observa-se tendência significativa a 95% para janeiro, fevereiro e setembro, na média anual e no período chuvoso.

**Tabela 5.7** – Análise de regressão aplicada à temperatura máxima do ar (°C) em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE.

Período	Temperatura Máxima do Ar					
	$\alpha = 0,05$					
	Bebedouro		Mandacaru		Petrolina	
	C. Ang.	Valor P	C. Ang.	Valor P	C. Ang.	Valor P
<b>Janeiro</b>	0,0594	0,0008	0,0779	0,0001	0,0436	0,0076
<b>Fevereiro</b>	0,0581	0,0069	0,0799	0,0005	0,0536	0,0038
<b>Março</b>	0,0582	0,0020	0,0779	0,0001	0,0281	0,0797
<b>Abril</b>	0,0551	0,0027	0,0767	0,0001	0,0249	0,1419
<b>Mai</b>	0,0347	0,0765	0,0562	0,0018	0,0142	0,3803
<b>Junho</b>	0,0464	0,0006	0,0499	0,0000	0,0111	0,2731
<b>Julho</b>	0,0352	0,0069	0,0422	0,0006	0,0031	0,7443
<b>Agosto</b>	0,0226	0,0197	0,0289	0,0080	0,0033	0,7135
<b>Setembro</b>	0,0332	0,0062	0,0463	0,0001	0,0206	0,0464
<b>Outubro</b>	0,0259	0,0306	0,0408	0,0003	0,0158	0,0697
<b>Novembro</b>	0,0206	0,1015	0,0366	0,0127	0,0181	0,1325
<b>Dezembro</b>	0,0363	0,1160	0,0529	0,0253	0,0144	0,3538
<b>Anual</b>	0,0405	0,0000	0,0555	0,0000	0,0209	0,0012
<b>Chuvoso</b>	0,0480	0,0000	0,0670	0,0000	0,0305	0,0007
<b>Seco</b>	0,0330	0,0004	0,0441	0,0000	0,0114	0,0698

#### 5.4.1.6 – Temperatura Mínima do Ar

Os resultados da temperatura mínima mostram algumas diferenças quando comparados com a temperatura máxima. Em Bebedouro, as séries de janeiro, março, abril, maio, junho, dezembro, médias anuais e dos períodos chuvoso e seco apresentaram tendências positivas, significativas ao nível de 95%. As análises das demais séries apresentaram tendências positivas, porém, sem significância estatística. Em Mandacaru, apenas os meses de janeiro, março e maio apresentaram tendência negativa, mas sem significância estatística. Os resultados para Petrolina, exceto pelo mês de setembro, mostram tendências positivas, sem significância estatística. Os demais apresentaram tendência positiva significativa a 95% (Tabela 5.8).

O resultado mais relevante desta análise, foi o comportamento oposto observado para Mandacaru quando comparados com aqueles obtidos para Bebedouro e Petrolina. Nos meses do período seco, Mandacaru é a estação com os maiores valores, em módulo, observados na Tabela 5.8. Em outras palavras, ao longo dos anos, as noites em Mandacaru se tornaram mais frias a uma taxa maior do que as noites em Bebedouro e em Petrolina que se tornaram mais quentes.

**Tabela 5.8** – Análise de regressão aplicada à temperatura mínima do ar (°C) em Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE.

Período	Temperatura Mínima do Ar					
	$\alpha = 0,05$					
	Bebedouro		Mandacaru		Petrolina	
	C. Ang.	Valor P	C. Ang.	Valor P	C. Ang.	Valor P
<b>Janeiro</b>	0,0396	0,0033	-0,0212	0,0880	0,0404	0,0000
<b>Fevereiro</b>	0,0279	0,0687	-0,0282	0,0466	0,0469	0,0000
<b>Março</b>	0,0424	0,0025	-0,0235	0,0652	0,0566	0,0000
<b>Abril</b>	0,0422	0,0021	-0,0272	0,0202	0,0483	0,0000
<b>Mai</b>	0,0448	0,0014	-0,0244	0,0593	0,0423	0,0001
<b>Junho</b>	0,0311	0,0491	-0,0410	0,0025	0,0267	0,0078
<b>Julho</b>	0,0287	0,0524	-0,0471	0,0002	0,0192	0,0271
<b>Agosto</b>	0,0227	0,1382	-0,0465	0,0004	0,0218	0,0070
<b>Setembro</b>	0,0134	0,2847	-0,0659	0,0000	0,0168	0,0649
<b>Outubro</b>	0,0164	0,2440	-0,0546	0,0000	0,0247	0,0225
<b>Novembro</b>	0,0186	0,1819	-0,0531	0,0000	0,0231	0,0178
<b>Dezembro</b>	0,0301	0,0347	-0,0350	0,0113	0,0371	0,0002
<b>Anual</b>	0,0298	0,0037	-0,0390	0,0003	0,0337	0,0000
<b>Chuvoso</b>	0,0335	0,0018	-0,0314	0,0031	0,0421	0,0000
<b>Seco</b>	0,0262	0,0147	-0,0466	0,0001	0,0253	0,0009

#### 5.4.1.7 – Síntese dos Resultados

Uma síntese dos resultados obtidos com a Análise de Regressão para as séries temporais de precipitação, razão de mistura, vento, ATD, temperatura máxima do ar e temperatura mínima do ar, de Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE, é aprestada no Quadro 5.1. Para facilitar a visualização dos resultados, foram utilizados os símbolos “+” e “++” para representar tendências positivas e positivas significativas ao nível de 95%, respectivamente, e “-” e “--” para tendências negativas e tendências negativas significativas ao nível de 95%,

respectivamente. Além disso, as cores azul e laranja foram usadas para destacar a presença de tendência com significância estatística positiva e negativa, respectivamente.

**Quadro 5.1** – Resumo da Análise de Regressão aplicada às séries temporais de Bebedouro-PE (B), Mandacaru-BA (M) e Petrolina-PE (P).

Período	Precipitação			R. de Mistura			Vento	ATD			T. Máxima			T. Mínima		
	B	M	P	B	M	P	P	B	M	P	B	M	P	B	M	P
<b>Janeiro</b>	-	-	-	-	++	-	--	+	++	+	++	++	++	++	-	++
<b>Fevereiro</b>	-	-	-	-	++	-	--	+	++	+	++	++	++	+	--	++
<b>Março</b>	-	-	-	-	++	-	--	+	++	--	++	++	+	++	-	++
<b>Abril</b>	-	+	+	-	++	-	--	+	++	-	++	++	+	++	--	++
<b>Mai</b>	+	-	-	-	++	+	--	-	++	--	+	++	+	++	-	++
<b>Junho</b>	-	-	-	-	++	+	--	+	++	-	++	++	+	++	--	++
<b>Julho</b>	-	+	+	-	++	+	--	+	++	-	++	++	+	+	--	++
<b>Agosto</b>	-	+	+	-	++	+	--	-	++	--	++	++	+	+	--	++
<b>Setembro</b>	-	-	-	-	++	+	--	+	++	+	++	++	++	+	--	+
<b>Outubro</b>	+	+	+	-	++	+	--	+	++	-	++	++	+	+	--	++
<b>Novembro</b>	-	-	-	-	++	+	--	+	++	-	+	++	+	+	--	++
<b>Dezembro</b>	+	-	+	-	++	+	--	+	++	-	+	++	+	++	--	++
<b>Anual</b>	-	-	-	-	++	+	--	+	++	-	++	++	++	++	--	++
<b>Chuvoso</b>	-	-	-	-	++	-	--	+	++	-	++	++	++	++	--	++
<b>Seco</b>	-	-	-	-	++	+	--	+	++	-	++	++	+	++	--	++

Resultados que não apresentaram significância estatística, não necessariamente significa que não precisam ser analisados com atenção. No entanto, é importante notar que os resultados mais significativos ocorreram em Mandacaru na umidade, na ATD e na temperatura mínima, principalmente. As mudanças nesta área, ao longo dos anos, devem ter relação direta com essas mudanças no comportamento das variáveis meteorológicas.

## 5.5 – Testes Não-Paramétricos: Teste Run, Teste Sequencial de Mann-Kendall (SMK) e Teste de Pettitt

### 5.5.1 – Teste Run

Uma das premissas para aplicação do teste sequencial de Mann-Kendall, é que as séries passem pelo teste Run. Neste caso, a hipótese nula ( $H_0$ ) é que as séries são homogêneas. Desta forma, para facilitar a compreensão dos resultados do teste foi utilizada a simbologia “H” para uma série homogênea e “NH” para uma série não-homogênea. Primeiramente, o teste foi aplicado à série bruta e, quando o resultado mostrou que a série é NH, retirou-se a tendência linear e o teste foi reaplicado. Se a hipótese nula foi aceita, ou seja, quando a série passou a ser

homogênea, o teste sequencial de Mann-Kendall foi aplicado. Caso contrário, não se aplicou o teste. Nos casos em que o resultado está em vermelho no Quadro 5.2, indicam que o teste precisou ser reaplicado. O teste Run foi aplicado às séries das médias anuais, do período chuvoso e do período seco.

**Quadro 5.2** – Resultados estatísticos do teste Run para as séries temporais de Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE.

Período	Precipitação			R. de Mistura			Vento	ATD			T. Máxima			T. Mínima		
	B	M	P	B	M	P	P	B	M	P	B	M	P	B	M	P
Anual	H	H	H	H	NH	H	H	H	NH	H	H	H	H	NH	H	H
Chuvoso	H	H	H	H	H	NH	H	H	H	H	H	H	H	NH	H	NH
Seco	H	H	H	H	H	H	H	H	NH	H	H	H	H	H	NH	H

Observa-se que a hipótese nula foi aceita em quase todas as séries, exceto em Bebedouro para a temperatura mínima da série anual e do período chuvoso. Já em Mandacaru ocorreu para a razão de mistura da série anual, ATD da série anual e do período seco e da temperatura mínima do período seco e, em Petrolina, para a razão de mistura e temperatura mínima do período chuvoso.

### 5.5.2 – Teste Sequencial de Mann-Kendall e Teste de Pettitt

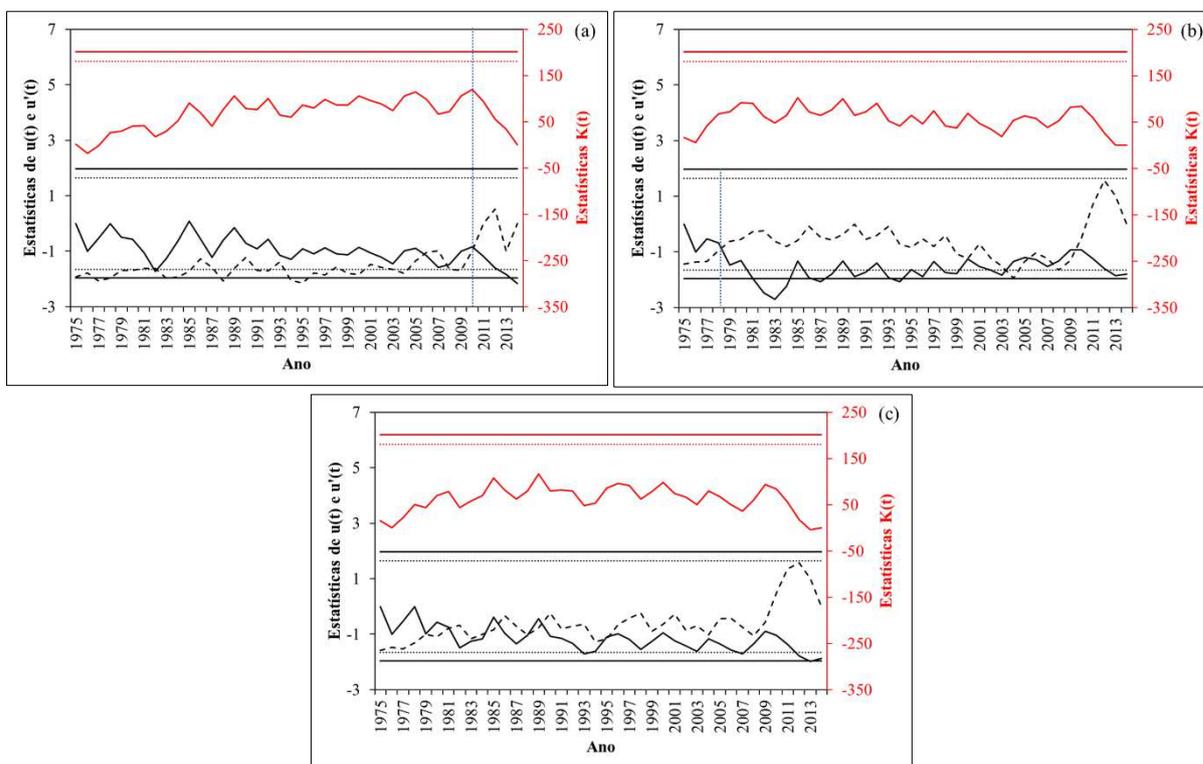
Nesta seção são apresentados os gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e do teste de Pettitt para as séries anuais, do período chuvoso e do período seco para as estações de Bebedouro, Mandacaru e Petrolina que foram consideradas homogêneas pelo teste run, mostradas no Quadro 5.2.

Nos gráficos, a linha vermelha representa a curva do teste de Pettitt, a linha vermelha pontilhada horizontal indica o nível de confiança de 90%, enquanto a linha vermelha contínua horizontal se refere ao nível de confiança de 95%. A linha preta contínua representa a estatística  $u(t)$  do teste sequencial de Mann-Kendall, enquanto a linha preta tracejada representa a estatística  $u'(t)$ . Já as linhas pretas horizontais pontilhadas e contínuas representam os níveis de confiança de 90% e 95%, respectivamente. As linhas azuis pontilhadas verticais foram utilizadas para indicar os anos em que houve o início de tendências significativas no teste de Mann-Kendall e de Pettitt.

### 5.5.2.1 – Precipitação

a – Anual

Na Figura 5.9 são mostrados os resultados do Mann-Kendall e do Pettitt para as séries dos totais anuais de precipitação em Bebedouro, Mandacaru e Petrolina. Na parte inferior da Figura 5.9a, pela curva preta contínua, observa-se um comportamento de tendência negativa, de forma geral. Há o cruzamento entre as curvas de  $u(t)$  e  $u'(t)$  no ano de 2010 e, como a curva de  $u(t)$  cruza as linhas horizontais de significância estatística, poder-se-ia dizer que há uma tendência significativa de redução na precipitação em Bebedouro, no entanto, este resultado não é confirmado pelo teste de Pettitt, uma vez que não há o cruzamento da curva de estatística  $K(t)$  com as linhas de significância estatística do teste.



**Figura 5.9** – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries anuais da precipitação (mm) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.

Em Mandacaru (Figura 5.9b), há o cruzamento das curvas das estatísticas de  $u(t)$  e  $u'(t)$  no ano de 1978, chegando a cruzar o nível de 95% de significância estatística, mas essa tendência de redução não é confirmada pelo teste de Pettitt. Em Petrolina (Figura 5.9c), embora haja uma tendência geral de redução na precipitação, não existe uma redução significativa estatisticamente.

Esses resultados estão em desacordo com os encontrados por [Morais et al. \(2016\)](#). Utilizando também o teste de tendência de Mann-Kendall, os autores observaram tendência de aumento na precipitação em Petrolina. No entanto, a série utilizada por eles corresponde ao período de 1915 a 2014. A contribuição para tendência positiva ocorreu principalmente na década de 1960, fora do período que foi analisado nesta pesquisa.

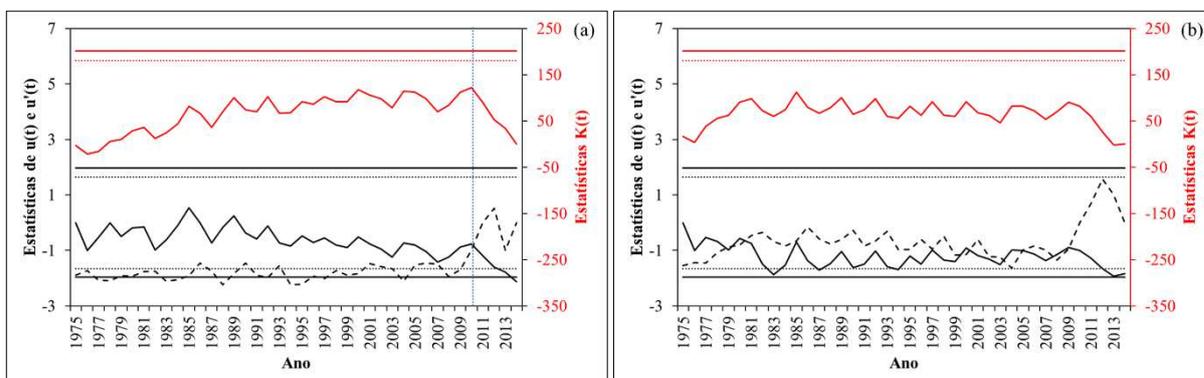
Outros estudos mostraram que a tendência na precipitação tem influência do período analisado e que não há consenso na existência de reduções na precipitação na região do semiárido do Nordeste nas décadas de 1960 e 1970 ([Marengo et al. 2011](#)).

Por outro lado, [Penereiro e Garcia \(2017\)](#) encontraram tendência negativa na série temporal da precipitação e acreditam que uma combinação de fatores climatológicos e antrópicos explicam os resultados obtidos. Conclui-se, portanto, que resultados opostos, não necessariamente, invalidam o método como ferramenta de análise.

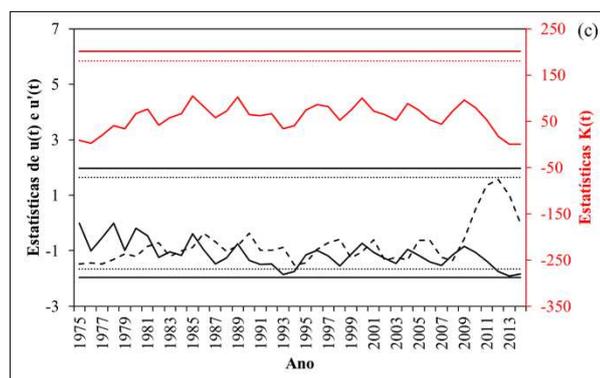
Neste caso, é possível deduzir que as influências antrópicas, amplamente observadas nesta região do vale do São Francisco pode ser um dos fatores contribuintes para a redução da precipitação observada a longo prazo nas séries temporais.

#### b – Período Chuvoso

Analisando separadamente o período chuvoso, não são observadas tendências significativas em nenhuma das localidades. Em Bebedouro (Figura 5.10a), pelo comportamento da curva de  $u(t)$ , observa-se nitidamente uma redução da precipitação ao longo da série e que há um cruzamento com a curva de  $u'(t)$  no ano de 2010, mas sem significância estatística e confirmada pelo teste de Pettitt.



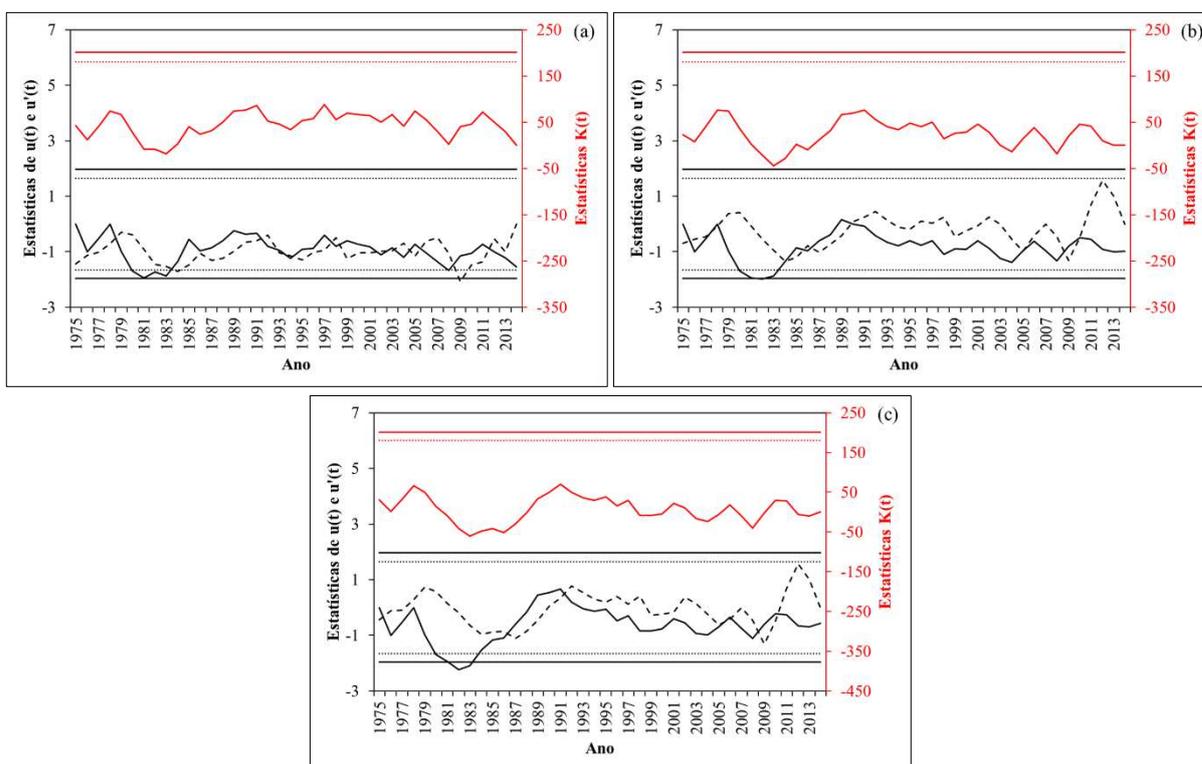
**Figura 5.10** – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período chuvoso da precipitação (mm) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.(continua)



**Figura 5.10** – (conclusão).

c – Período Seco

No período seco, observando o comportamento das curvas de  $u(t)$  nas três estações, é verifica-se uma certa estabilidade na variabilidade da precipitação nesse período do ano, não havendo qualquer tendência bem definida ao longo das séries temporais.

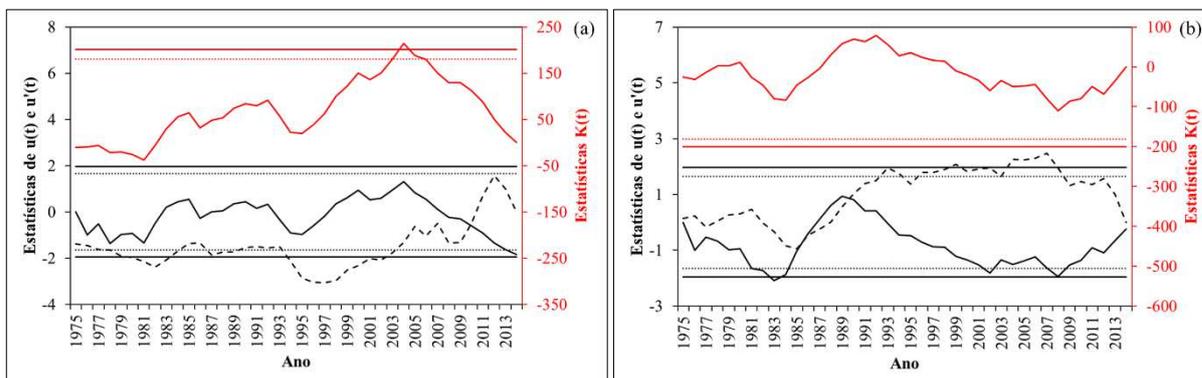


**Figura 5.11** – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período seco da precipitação (mm) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.

### 5.5.2.2 – Razão de Mistura

#### a – Anual

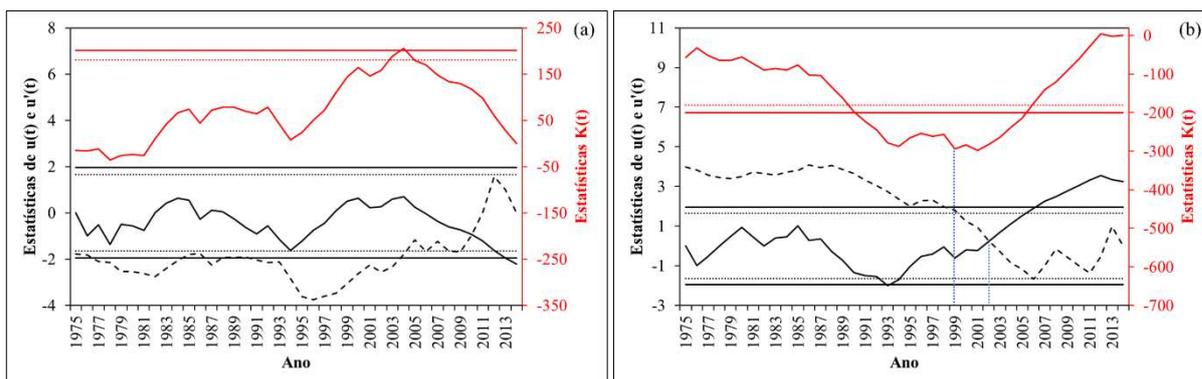
No caso da variável razão de mistura, apenas as séries anuais de Bebedouro e Petrolina foram consideradas homogêneas e, por esta razão, não foi aplicado o teste sequencial de Mann-Kendall em Mandacaru. Em Bebedouro (Figura 5.12a) há um comportamento geral ascendente da curva de  $u(t)$  até o ano de 2004, iniciando uma tendência negativa a partir deste ano, porém não significativa. A curva da estatística  $K(t)$  cruza o nível de significância de 95% no ano de 2005, porém, este resultado é irrelevante, uma vez que não foi observado nada no outro teste sequencial de Mann-Kendall. Em Petrolina (Figura 5.12b), verifica-se uma redução na razão de mistura observada até o ano de 1983, seguido de aumento até o ano de 1989 e, posteriormente, com o cruzamento entre as curvas de  $u(t)$  e  $u'(t)$  é iniciada uma tendência de redução da razão de mistura, mas sem significância estatística.



**Figura 5.12** – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries anuais da razão de mistura (g/kg) de: (a) Bebedouro-PE e (b) Petrolina-PE.

#### b – Período Chuvoso

No período chuvoso, apenas as séries temporais de Bebedouro e de Mandacaru foram consideradas homogêneas. Em Bebedouro (Figura 5.13a) há um período de redução na razão de mistura entre os anos de 1984 e 1994, como pode ser observado pela curva da estatística de  $u(t)$ , seguido de um aumento até o ano de 2004, iniciando novamente uma tendência negativa até o final da série. Já em Mandacaru (Figura 5.13b), a partir de 1993, há um comportamento da curva da estatística  $u(t)$  indicando uma tendência de aumento da razão de mistura na atmosfera e, com o cruzamento entre as curvas  $u(t)$  e  $u'(t)$  no ano de 2002, seguindo com o cruzamento da linha de 95% de significância estatística. O teste de Pettitt indica o ano de 1999 como início da tendência significativa estatisticamente.



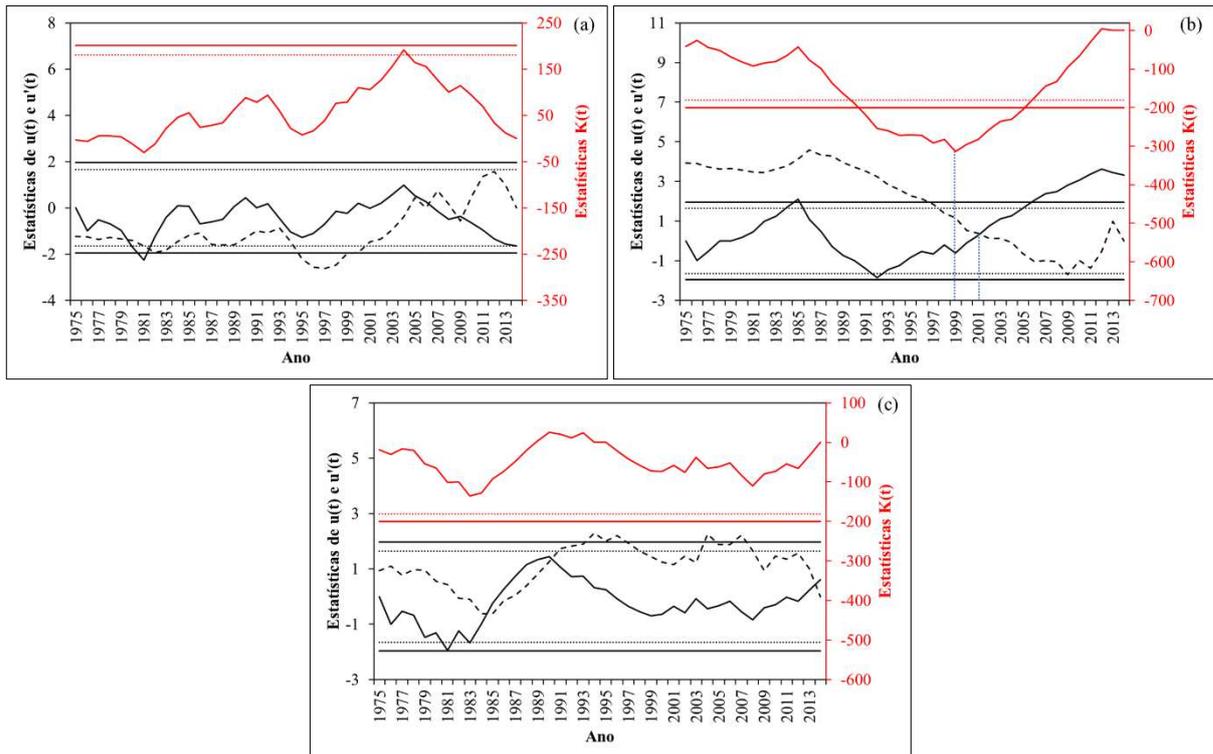
**Figura 5.13** – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período chuvoso da razão de mistura (g/kg) de: (a) Bebedouro-PE e (b) Mandacaru-BA.

Esse resultado pode ser considerado como um dos mais relevantes dessa pesquisa, já que valida as informações extraídas tanto das análises com os gráficos de caixa (*boxplot*) quanto das imagens do Sensoriamento Remoto, apresentadas anteriormente. Ambos os métodos foram eficientes em indicar mudanças substanciais nas localidades analisadas. Além disso, os sinais encontrados na atmosfera através da análise da razão de mistura (aumento da umidade do ar) evidenciam que a participação do Estado por meio de investimentos para beneficiar o agronegócio e, conseqüentemente, alavancar a economia da região, passou por intervenções significativas na cobertura e uso da terra.

Esse tipo de adaptação que interfere diretamente em fatores decisivos, tais como tipo de cultura, localidade, enriquecimento do solo, altera o balanço de energia em superfície e a troca de água e calor entre a superfície e a atmosfera.

#### c – Período Seco

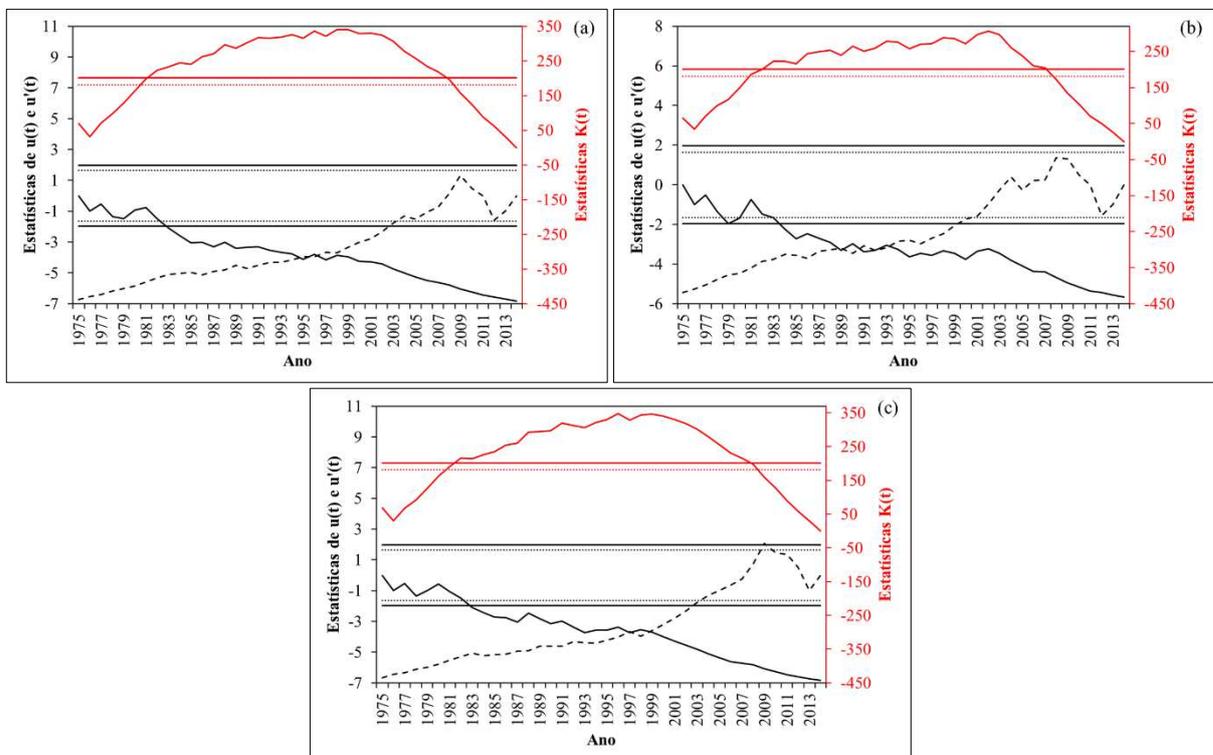
Na Figura 5.14a (Bebedouro), observa-se um comportamento de tendência de crescimento na razão de mistura, seguida de uma tendência de redução acentuada, a partir de 2004, porém, sem significância estatística. Em Mandacaru (Figura 5.14b), a partir do ano de 1992 é observado um aumento da razão de mistura ao longo dos anos, considerado significativo estatisticamente pelo cruzamento entre as curvas de  $u(t)$  e  $u'(t)$  e do nível de significância de 95%. O teste de Pettitt indica o ano de 1999 como sendo o início da tendência significativa. Já em Petrolina (Figura 5.14c) é observada uma tendência de redução da razão de mistura, de forma geral, a partir do comportamento da curva de  $u(t)$ .



**Figura 5.14** – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período seco da razão de mistura (g/kg) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.

### 5.5.2.3 – Vento

a – Anual, Período Chuvoso e Período Seco



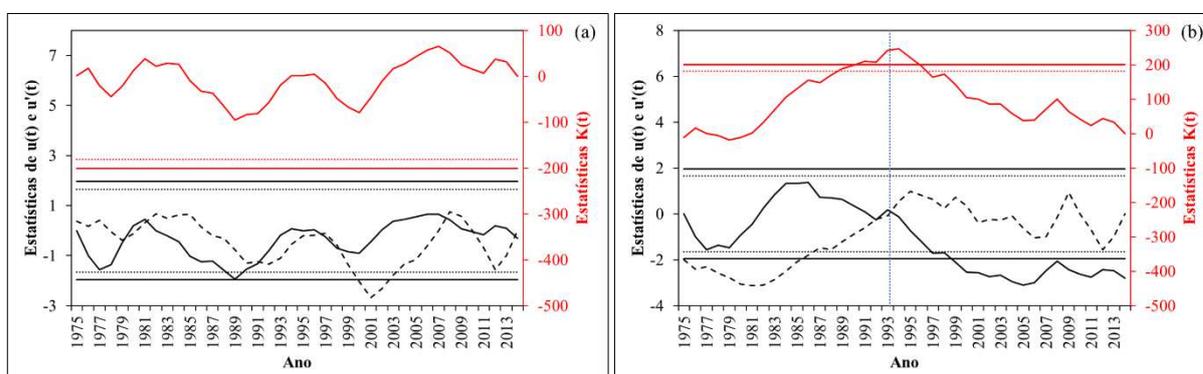
**Figura 5.15** – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt do vento (km/dia) em Petrolina-PE para as séries: (a) anual, (b) período chuvoso e (c) período seco.

A Figura 5.15 apresenta os resultados dos testes sequencial de Mann-Kendall e o de Pettitt para as séries de vento na estação de Petrolina. É observada tendência decrescente acentuada na velocidade do vento em todo o período observado da série. No entanto, como as curvas de  $u(t)$  e  $u'(t)$  se cruzam fora dos limites de confiança do teste de Mann-Kendall não se pode afirmar que houve uma tendência significativa. A diminuição mais abrupta na intensidade do vento é perceptível em 1980. Esse período coincide com a formação do Lago de Sobradinho. Segundo [Correia et al. \(2006\)](#), um dos efeitos significativos de Sobradinho foi a mudança no padrão de vento local resultante da formação de brisa lacustre. A circulação da brisa é no sentido oposto da direção dos alísios o que justifica, em parte a redução na intensidade. Os perímetros irrigados, também contribuíram para a geração de circulações do tipo brisa.

#### 5.5.2.4 – Amplitude Térmica Diária

a – Anual

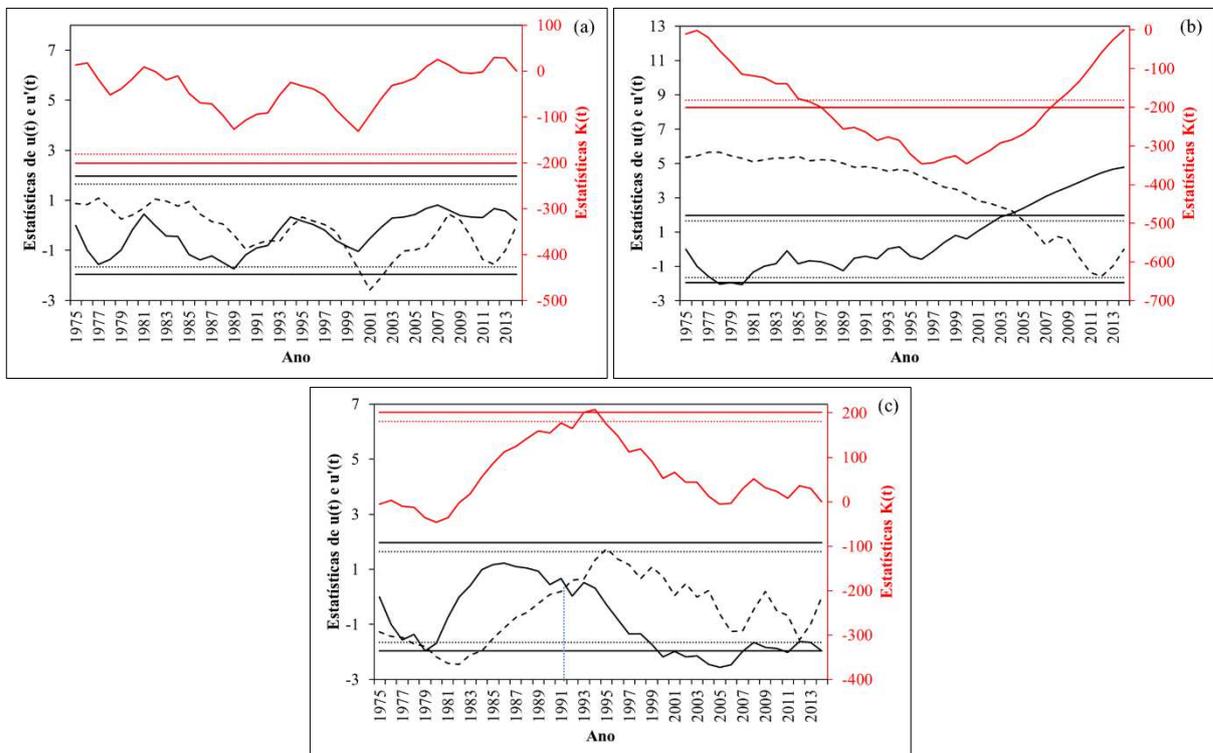
Na Figura 5.16 são mostrados os gráficos das séries anuais de Bebedouro e Petrolina apenas, já que a série de Mandacaru foi considerada não homogênea pelo teste run. Em Bebedouro (Figura 5.16a) não é observada uma tendência forte ao longo da série temporal. Em Petrolina (Figura 5.16b), por sua vez, observa-se uma tendência de redução da ATD iniciada em 1986 até o final da série temporal. O ano de 1993 é indicado pelo teste de Mann-Kendall e confirmado pelo teste de Pettitt como sendo o início da tendência decrescente significativa ao nível de 95%, pelo cruzamento entre as curvas de  $u(t)$  e  $u'(t)$  e, posteriormente, cruzando a linha do nível de significância de 95%. A curva da estatística  $K(t)$  também cruza a linha de significância estatística de 95%.



**Figura 5.16** – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries anuais da ATD ( $^{\circ}\text{C}$ ) de: (a) Bebedouro-PE e (b) Petrolina-PE.

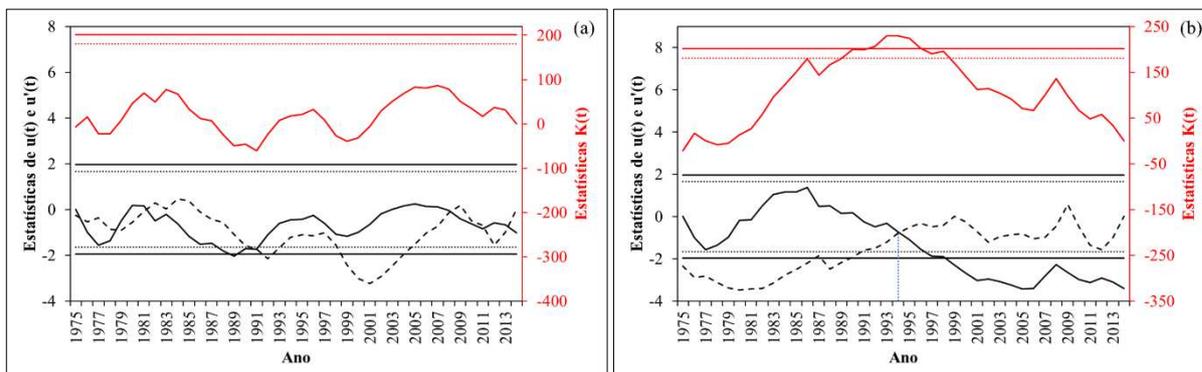
b – Período Chuvoso

No período chuvoso, há pouca variabilidade observada na ATD em Bebedouro (Figura 5.17a). Em Mandacaru (Figura 5.17b), há o início de uma tendência de aumento já no ano de 1980, seguindo até o final da série temporal, porém, como as curvas de  $u(t)$  e  $u'(t)$  se cruzam fora da região entre os níveis de significância, não pode ser considerado, pelo teste de Mann-Kendall que houve uma tendência com significância estatística. Pelo teste de Pettitt, o ano 2000 seria o início da tendência significativa em Mandacaru. Em Petrolina (Figura 5.17c) há uma tendência de redução na ATD iniciando em meados da década de 1980 e tornando-se significativa estatisticamente em 1991, com o cruzamento das curvas de  $u(t)$  e  $u'(t)$ . Pelo teste de Pettitt, o ano de 1994 seria o início da tendência significativa.



**Figura 5.17** – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período chuvoso da ATD ( $^{\circ}\text{C}$ ) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.

### c – Período Seco



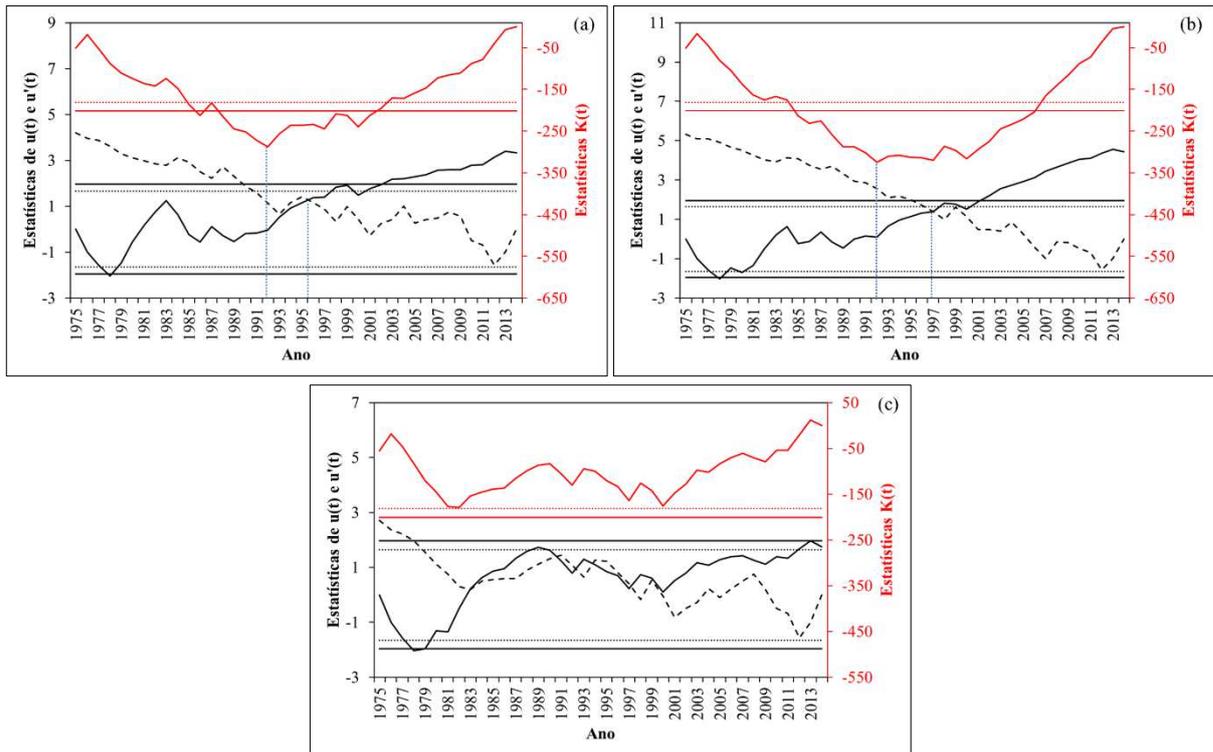
**Figura 5.18** – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período seco da ATD (°C) de: (a) Bebedouro-PE e (b) Petrolina-PE.

No período seco, apenas as séries de Bebedouro e Petrolina foram consideradas homogêneas pelo teste *run*. Em Bebedouro (Figura 5.18a) não é observada uma tendência definida ao longo da série temporal, considerando que há pouca variabilidade no comportamento da série. Em Petrolina (Figura 5.18b), é observada uma tendência de redução na ATD iniciada em 1986 e tornando-se significativa em 1994 pelo teste de Mann-Kendall e confirmada pelo teste de Pettitt.

#### 5.5.2.5 – Temperatura Máxima do Ar

##### a – Anual

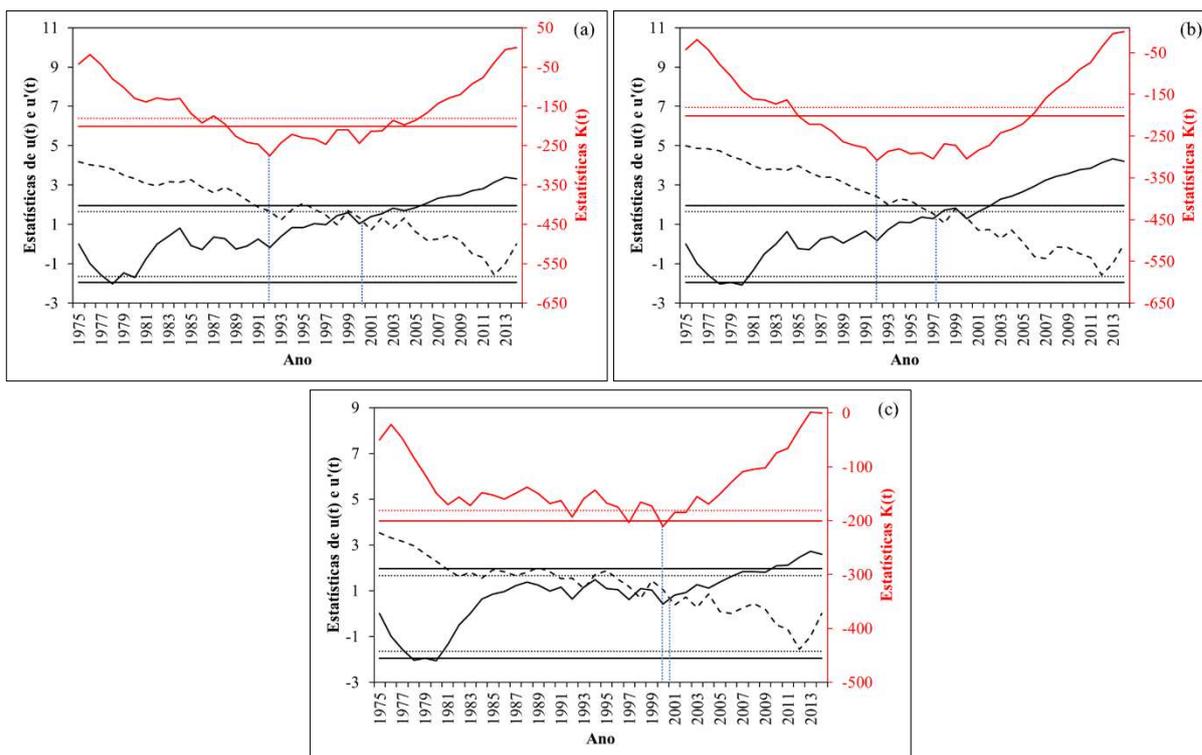
Pelos gráficos da temperatura máxima do ar das séries anuais, observa-se que ocorre uma tendência positiva em Bebedouro (Figura 5.19a) e em Mandacaru (Figura 5.19b) tornando-se significativa em 1996 em Bebedouro e em 1997 em Mandacaru. Pelo teste de Pettitt a tendência teria iniciado em 1992 nas duas estações. Em Petrolina (Figura 5.19c), há uma tendência de aumento da temperatura máxima iniciando em 1979 até 1989 e, a partir daí, existe uma variabilidade, mas não tão relevante como no período inicial.



**Figura 5.19** – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries anuais da temperatura máxima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.

#### b – Período Chuvoso

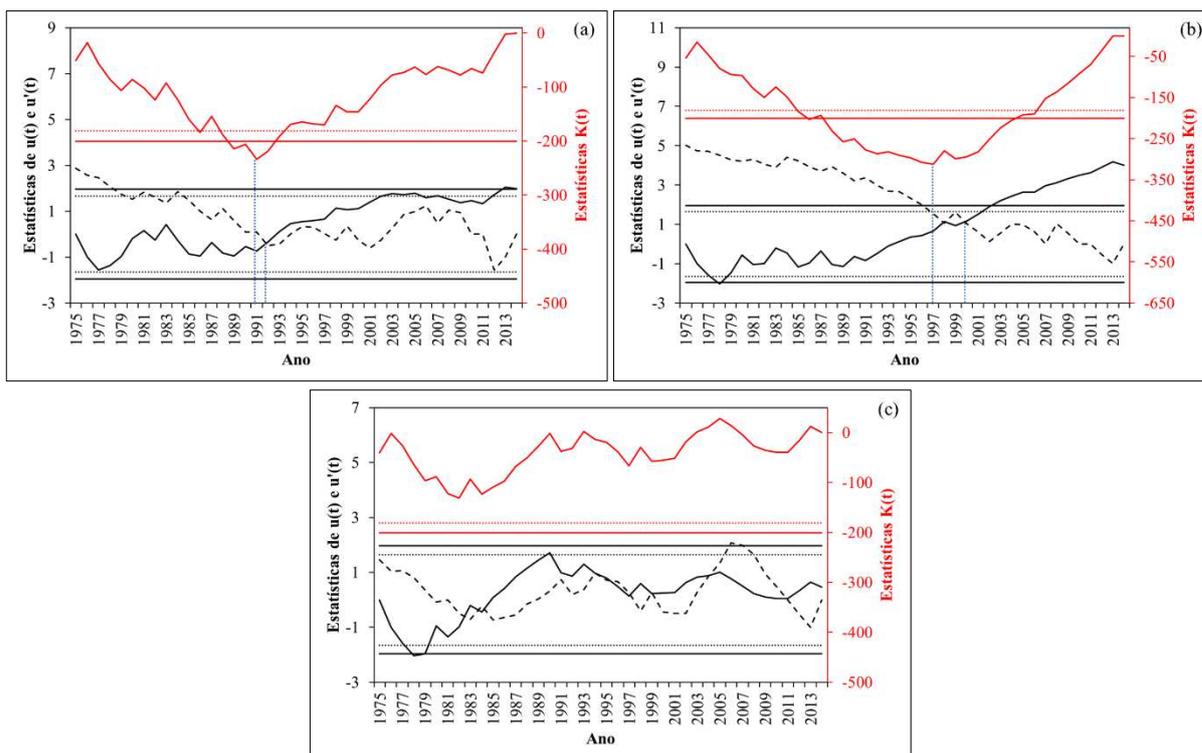
No período chuvoso, acontece um comportamento semelhante do que foi observado nas séries anuais em Bebedouro e em Mandacaru. Na Figura 5.20a, em Bebedouro, é observada uma tendência positiva que começa em 1992, tornando-se significativa em 2000, com o cruzamento das curvas de  $u(t)$  e  $u'(t)$ . O ano de 1992 foi o ano indicado pelo teste de Pettitt como sendo o início da tendência. Em Mandacaru (Figura 5.20b), a tendência positiva também se inicia em 1992, tornando-se significativa em 1997 e também indicada pelo teste de Pettitt como tendo início em 1992. Em Petrolina (Figura 5.20c), também é observada uma tendência positiva que começa em 2000 e torna-se significativa em 2001. O teste de Pettitt indica o ano de 2000 como sendo o início da tendência.



**Figura 5.20** – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período chuvoso da temperatura máxima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.

c – Período Seco

Na Figura 5.21a é observado que, em Bebedouro, no período seco, em 1991 começa uma tendência positiva, tornando significativa a 90% em 1992. Pelo teste de Pettitt, a tendência começa em 1991. Em Mandacaru (Figura 5.21b), a tendência positiva começa no início da década de 1990 e torna-se significativa em 2000. Pelo teste de Pettitt, o ano de 1997 é o início da tendência positiva. Em Petrolina (Figura 5.21c), observa-se uma tendência de aumento na temperatura máxima do ar, começando no final da década de 1970 até o ano de 1990. A partir daí, há uma queda nos valores e pouca variação até o final da série temporal.



**Figura 5.21** – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período seco da temperatura máxima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) de: (a) Bebedouro-PE, (b) Mandacaru-BA e (c) Petrolina-PE.

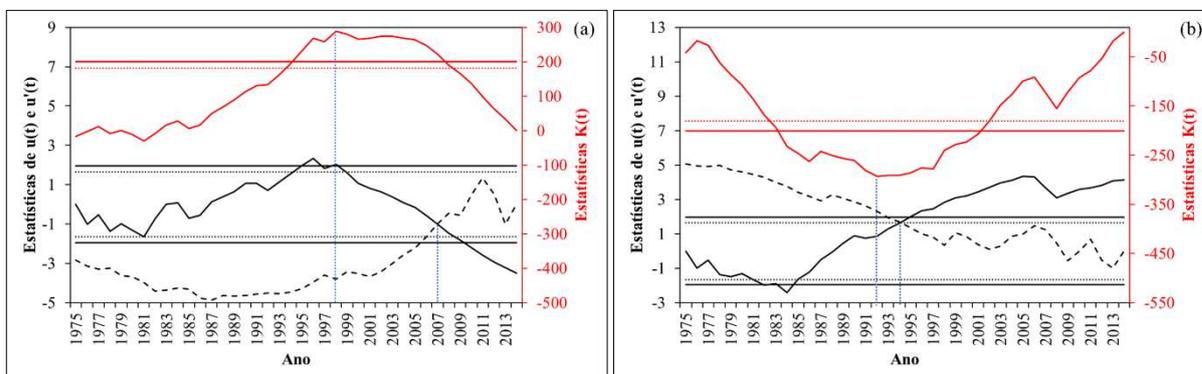
### 5.5.2.6 – Temperatura Mínima do Ar

#### a – Anual

Das três estações observadas, apenas a de Mandacaru e de Petrolina passaram no teste run, em relação às séries anuais da temperatura mínima do ar. Na Figura 5.22a temos os gráficos do teste de Mann-Kendall e de Pettitt para Mandacaru, em que é observada uma suave tendência de redução da temperatura no início da série temporal, entre 1975 e 1981, seguido de anos sucessivos de aumento das médias anuais, atingindo um valor máximo em 1996, começando uma tendência negativa persistente até o final da série observada, tornando significativa estatisticamente no ano de 2007, com o cruzamento das curvas de  $u(t)$  e  $u'(t)$ . O teste de Pettitt indica o ano de 1998 como sendo o início da tendência decrescente da temperatura mínima em Mandacaru.

Em Petrolina (Figura 5.22b), observa-se um comportamento oposto. Há uma tendência de redução na temperatura também no início da série temporal, até o ano de 1984, como ocorreu em Mandacaru, porém, a partir deste ano, é observada uma tendência de aumento até o final da

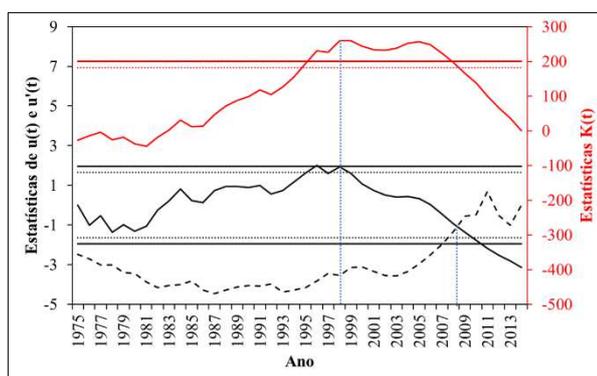
série, tornando-se significativa no ano de 1994. Pelo teste de Pettitt, a tendência positiva torna-se consistente a partir do ano de 1992.



**Figura 5.22** – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries anuais da temperatura mínima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) de: (a) Mandacaru-BA e (b) Petrolina-PE.

#### b – Período Chuvoso

Na Figura 5.23 observa-se o comportamento da temperatura mínima do ar em Mandacaru no período chuvoso. Há uma grande semelhança com o que foi verificado na série das médias anuais, com uma leve tendência de redução da temperatura nos primeiros anos da série temporal, até o ano de 1980, seguido de uma tendência crescente até o ano de 1996, quando uma tendência de redução na temperatura até o final da série. Essa tendência negativa torna-se significativa em 2008, pelo teste de Mann-Kendall, confirmado pelo teste de Pettitt, com início no ano de 1998.

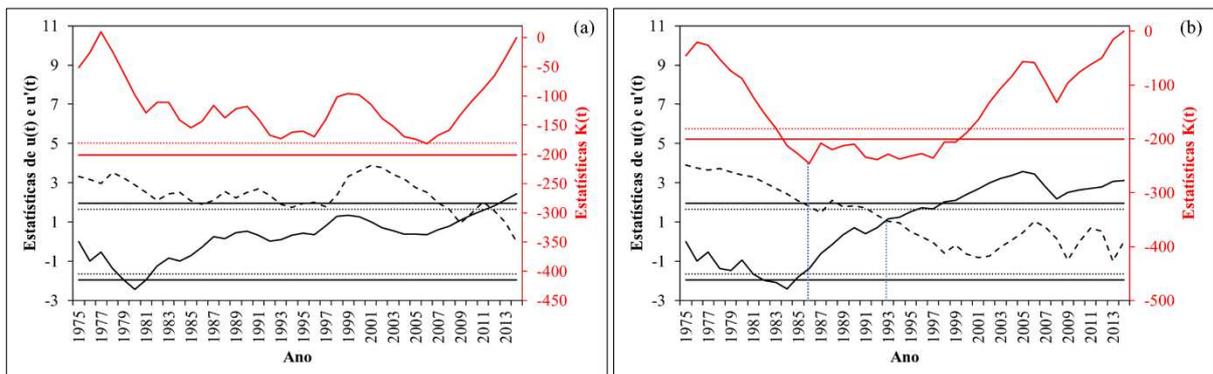


**Figura 5.23** – Gráfico do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para a série do período chuvoso da temperatura mínima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) de Mandacaru-BA.

### c – Período Seco

No período seco, apenas as séries das estações de Bebedouro e Petrolina foram consideradas homogêneas pelo teste *run*. Na Figura 5.24a, em Bebedouro, observa-se uma tendência positiva na temperatura mínima do ar, no entanto, pelo teste de Mann-Kendall, essa tendência não é significativa estatisticamente. O teste de Pettitt também não indica nenhum ano significativo.

Em Petrolina (Figura 5.24b), é observada uma tendência negativa no início da série temporal e, a partir do ano de 1984, inicia-se uma tendência positiva ao longo de quase todos os anos seguintes. O cruzamento das curvas das estatísticas de  $u(t)$  e  $u'(t)$  no ano de 1993, indica que essa tendência positiva é significativa estatisticamente e que o início ocorreu no ano de 1986, como mostra o valor mínimo observado pelo teste de Pettitt.



**Figura 5.24** – Gráficos do teste sequencial de Mann-Kendall e de Pettitt para as séries do período seco da temperatura mínima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) de: (a) Bebedouro-PE e (b) Petrolina-PE.

### 5.6 – Análise de Variância (ANOVA)

Os resultados obtidos até o momento com diferentes ferramentas de análise (paramétricas e não paramétricas) indicam diferentes graus de intervenções antrópicas nas localidades investigadas. Esse indicativo surge como mudanças no padrão de comportamento de alguns parâmetros atmosféricos. Esses reflexos são mais nítidos entre 1991 e 2000. Esse período coincide com o processo de modernização da agricultura no semiárido com a formação do complexo frutícola na região Juazeiro-Petrolina. Foi neste contexto que decidimos avaliar a possibilidade de que a formação do Complexo Agroindustrial (CAI) representa um fator modificador não apenas de ordem comercial pela inserção de um processo e industrialização, mas também que envolvem aspectos ambientais com impactos diretos no clima regional. Os impactos resultam efetivamente da intervenção no uso da terra em diferentes escalas espaciais. Em escala local, as mudanças na distribuição espacial dos fluxos turbulentos têm influência

direta microclima local e regional decorrente da geração de circulações termicamente induzidas e fluxos em mesoescala.

Neste sentido, a técnica da análise de variância foi utilizada com o propósito de investigar se existem diferenças climáticas significativas entre os períodos antes do CAI e depois do CAI. Em síntese, foram comparadas as médias mensais da razão de mistura, ATD, intensidade do vento, Temperaturas máximas e mínimas obtidas nos períodos antes e depois do CAI, para Bebedouro, Mandacaru e Petrolina. Os resultados podem indicar aumento ou redução significativa nos valores dos parâmetros investigados. A Hipótese nula é a de que não houve mudança nas médias dos parâmetros, o que é equivalente a supor que o fator (CAI) não tem influência sobre o valor da variável.

Na Tabela 5.9 são apresentados os valores do teste F e do valor-P para a ANOVA. Os valores mostrados na coluna “Valor-P” representam o maior valor do nível de significância para o qual  $H_0$  é rejeitada. Portanto, sempre que o “Valor-P” for menor que o  $\alpha$  adotado, ou  $F_{obs.} > F_{crítico}$ ,  $H_0$  deve ser rejeitada. Esse valor permite também avaliar o grau de significância das decisões.

#### a - Precipitação

Nas análises feitas para a precipitação para Bebedouro, Mandacaru e Petrolina, respectivamente, não foram observados resultados significativos, ou seja, não foi encontrado nenhum F observado maior que o F crítico. Isso mostra que não houve grande variação na precipitação entre os dois grupos da série temporal.

#### b - Razão de mistura

Para Mandacaru, as análises mostram um conjunto significativo de 14 registros com ( $F_{obs.} > F_{crítico}$ ), excluído o mês de junho. Esse resultado indica que a formação do Complexo Agroindustrial (CAI), mudou de forma significativa a umidade na área de Mandacaru. O Valor-P indica que  $H_0$  pode ser rejeitada ao nível de  $\alpha = 0,05$ , na maioria das situações. Em Petrolina, assim como em Bebedouro, não foram observadas nenhuma mudança significativa.

#### c - Vento

Os resultados da ANOVA para o vento a 10 m em Petrolina, mostra que apenas a série de fevereiro não apresentou mudança significativa como pode ser comprovado pelos valores de  $F_{obs}$  bem superiores ao valor do  $F_{crit}$ .

**Tabela 5.9**– Resultado da ANOVA aplicada às séries temporais de Bebedouro-PE, Mandacaru-BA e Petrolina-PE.

Período	Precipitação						Razão de Mistura						Vento					
	$F_{\text{crítico}} = 4,10 ; \alpha = 0,05$																	
	Bebedouro		Mandacaru		Petrolina		Bebedouro		Mandacaru		Petrolina		Bebedouro		Mandacaru		Petrolina	
	$F_{\text{obs}}$	Valor P	$F_{\text{obs}}$	Valor P	$F_{\text{obs}}$	Valor P	$F_{\text{obs}}$	Valor P	$F_{\text{obs}}$	Valor P	$F_{\text{obs}}$	Valor P	$F_{\text{obs}}$	Valor P	$F_{\text{obs}}$	Valor P	$F_{\text{obs}}$	Valor P
Janeiro	0,01	0,94	0,01	0,93	0,08	0,78	0,07	0,79	10,47	0,00	0,03	0,86	-	-	-	-	14,87	0,00
Fevereiro	0,08	0,78	0,23	0,63	0,01	0,94	0,03	0,86	6,96	0,01	1,86	0,18	-	-	-	-	3,72	0,06
Março	2,82	0,10	0,58	0,45	0,83	0,37	0,00	0,95	4,25	0,05	1,14	0,29	-	-	-	-	6,29	0,02
Abril	0,18	0,68	0,02	0,90	0,04	0,84	0,03	0,87	6,50	0,01	1,50	0,23	-	-	-	-	6,89	0,01
Mai	0,19	0,67	1,32	0,26	0,96	0,33	1,13	0,30	14,21	0,00	0,03	0,86	-	-	-	-	11,17	0,00
Junho	0,13	0,72	0,20	0,65	0,33	0,57	0,09	0,77	3,03	0,09	0,73	0,40	-	-	-	-	16,62	0,00
Julho	0,95	0,34	0,01	0,93	0,31	0,58	0,12	0,73	10,77	0,00	0,01	0,92	-	-	-	-	29,24	0,00
Agosto	0,08	0,77	1,86	0,18	0,41	0,53	0,30	0,59	20,54	0,00	0,00	0,96	-	-	-	-	25,55	0,00
Setembro	1,36	0,25	1,27	0,27	0,00	∅	0,04	0,84	17,51	0,00	0,02	0,88	-	-	-	-	28,70	0,00
Outubro	0,10	0,75	1,28	0,27	0,84	0,36	0,32	0,58	26,42	0,00	0,59	0,45	-	-	-	-	25,19	0,00
Novembro	0,08	0,78	0,06	0,80	0,00	0,98	0,22	0,64	65,98	0,00	0,90	0,35	-	-	-	-	18,86	0,00
Dezembro	0,01	0,92	0,32	0,57	0,12	0,73	0,05	0,83	24,35	0,00	1,24	0,27	-	-	-	-	7,23	0,01
Anual	1,32	0,26	0,36	0,55	0,59	0,45	0,00	0,98	29,19	0,00	0,07	0,79	-	-	-	-	41,06	0,00
Chuvoso	1,49	0,23	0,30	0,58	0,49	0,49	0,00	1,00	26,88	0,00	0,21	0,65	-	-	-	-	24,98	0,00
Seco	0,04	0,84	0,20	0,66	0,25	0,62	0,00	0,96	24,29	0,00	0,00	0,98	-	-	-	-	41,11	0,00
Período	ATD						Temperatura Máxima						Temperatura Mínima					
	$F_{\text{crítico}} = 4,10 ; \alpha = 0,05$																	
	Bebedouro		Mandacaru		Petrolina		Bebedouro		Mandacaru		Petrolina		Bebedouro		Mandacaru		Petrolina	
	$F_{\text{obs}}$	Valor P	$F_{\text{obs}}$	Valor P	$F_{\text{obs}}$	Valor P	$F_{\text{obs}}$	Valor P	$F_{\text{obs}}$	Valor P	$F_{\text{obs}}$	Valor P	$F_{\text{obs}}$	Valor P	$F_{\text{obs}}$	Valor P	$F_{\text{obs}}$	Valor P
Janeiro	0,15	0,70	13,53	0,00	0,19	0,66	6,89	0,01	9,73	0,00	4,47	0,04	9,43	0,00	0,99	0,33	24,31	0,00
Fevereiro	0,75	0,39	17,75	0,00	0,41	0,53	4,19	0,05	8,11	0,01	4,69	0,04	3,22	0,08	2,28	0,14	33,48	0,00
Março	0,34	0,56	19,19	0,00	12,29	0,00	7,82	0,01	14,74	0,00	1,16	0,29	9,64	0,00	1,26	0,27	32,67	0,00
Abril	0,41	0,53	17,66	0,00	5,27	0,03	6,99	0,01	14,29	0,00	0,46	0,50	6,99	0,01	2,88	0,10	26,46	0,00
Mai	0,47	0,50	11,54	0,00	6,83	0,01	1,53	0,22	6,64	0,01	0,04	0,84	7,36	0,01	1,30	0,26	15,17	0,00
Junho	0,29	0,59	16,85	0,00	3,92	0,06	7,77	0,01	15,09	0,00	0,04	0,85	3,01	0,09	5,87	0,02	3,26	0,08
Julho	0,05	0,83	23,91	0,00	3,41	0,07	6,53	0,01	14,06	0,00	0,18	0,67	3,88	0,06	8,74	0,01	2,35	0,13
Agosto	0,13	0,72	21,57	0,00	6,43	0,02	4,57	0,04	6,13	0,02	0,02	0,89	3,00	0,09	10,10	0,00	6,56	0,01
Setembro	2,20	0,15	43,70	0,00	0,02	0,88	8,90	0,00	16,88	0,00	3,13	0,08	1,40	0,24	16,53	0,00	4,91	0,03
Outubro	0,30	0,59	48,84	0,00	1,03	0,32	5,69	0,02	19,04	0,00	5,60	0,02	1,82	0,18	13,78	0,00	9,63	0,00
Novembro	0,17	0,68	20,43	0,00	1,51	0,23	1,07	0,31	4,74	0,04	0,57	0,46	1,93	0,17	16,71	0,00	8,03	0,01
Dezembro	0,06	0,81	15,40	0,00	7,94	0,01	2,10	0,16	5,31	0,03	0,23	0,64	4,16	0,05	3,22	0,08	18,76	0,00
Anual	0,24	0,63	36,87	0,00	10,48	0,00	14,12	0,00	34,39	0,00	3,75	0,06	8,46	0,01	8,06	0,01	30,87	0,00
Chuvoso	0,42	0,52	32,58	0,00	8,66	0,01	11,85	0,00	24,47	0,00	4,83	0,03	9,72	0,00	4,80	0,03	57,16	0,00
Seco	0,09	0,77	35,43	0,00	7,05	0,01	10,63	0,00	29,92	0,00	0,78	0,38	5,95	0,02	10,41	0,00	10,41	0,00

#### d - Amplitude Térmica Diária (ATD)

Para as séries da ATD em Bebedouro não foram observados resultados significativos. Já em Mandacaru, todos os valores observados de F foram bem superiores ao valor do F crítico (4,10). Este resultado mostra que foram grandes as mudanças entre os grupos testados. Em Petrolina as séries dos meses de março, abril, maio, agosto, dezembro, das médias anuais e dos períodos chuvoso e seco mostraram resultados significativos ( $F_{obs} > F_{crit}$ ).

#### e - Temperatura Máxima do Ar

Em Bebedouro, os resultados obtidos para a temperatura máxima do ar mostram que apenas os meses de maio, novembro e dezembro não apresentaram resultados significativos. As demais séries indicaram mudanças relevantes entre os grupos ( $F_{obs} > F_{crit}$ ). Em Mandacaru, todas as séries apresentaram resultados significativos, com valores observados de F bem superiores ao valor do F crítico, na maioria dos casos. Nos resultados encontrados em Petrolina, as séries dos meses de janeiro, fevereiro e outubro e do período chuvoso apresentaram resultados significativos ( $F_{obs} > F_{crit}$ ).

#### f - Temperatura Mínima do Ar

Nas análises feitas para a temperatura mínima do ar em Bebedouro, para os meses de janeiro, março, abril, maio e dezembro, das médias anuais, e dos períodos chuvoso e seco apresentaram resultados significativos ( $F_{obs} > F_{crit}$ ). Já em Mandacaru, as séries que apresentaram resultados significativos foram as dos meses de junho, julho, agosto, setembro, outubro, novembro, médias anuais e dos períodos chuvoso e seco. Para Petrolina, todas as séries apresentaram resultados significativos ( $F_{obs} > F_{crit}$ ), exceto as séries dos meses de junho e julho.

Com o objetivo de facilitar a visualização e comparação entre o comportamento das variáveis analisadas para Bebedouro, mandacaru e Petrolina, os resultados, foram agrupados no Quadro 5.3 com indicações de diferenças entre os períodos ante e depois do CAI. Também é destacado através de símbolos quando essas mudanças de aumento ou redução nos valores dos parâmetros foram significativas. O sinal de + indica aumento no valor da variável, o valor ++ indica aumento significativo, o sinal “ - “ indica queda no valor da variável e o sinal “- - “ indica redução significativa.

**Quadro 5.3** – Resumo da ANOVA para as séries temporais de Bebedouro-PE (B), Mandacaru-BA (M) e Petrolina-PE (P).

Período	Precipitação			R. de Mistura			Vento	ATD			T. Máxima			T. Mínima		
	B	M	P	B	M	P	P	B	M	P	B	M	P	B	M	P
Janeiro	+	+	-	-	++	-	--	+	++	-	++	++	++	++	-	++
Fevereiro	-	+	+	-	++	-	-	+	++	-	++	++	++	+	-	++
Março	-	-	-	+	++	-	--	+	++	--	++	++	+	++	-	++
Abril	-	-	+	+	++	-	--	+	++	--	++	++	+	++	-	++
Maió	+	-	-	+	++	-	--	-	++	--	+	++	+	++	-	++
Junho	-	-	-	-	+	-	--	+	++	-	++	++	+	+	--	+
Julho	-	-	-	-	++	-	--	+	++	-	++	++	-	+	--	+
Agosto	-	+	-	-	++	+	--	-	++	--	++	++	-	+	--	++
Setembro	-	-		-	++	+	--	+	++	-	++	++	+	+	--	++
Outubro	+	+	+	+	++	+	--	+	++	-	++	++	++	+	--	++
Novembro	-	-	-	+	++	+	--	-	++	-	+	++	+	+	--	++
Dezembro	-	-	-	-	++	+	--	+	++	--	+	++	+	++	-	++
Anual	-	-	-	+	++	-	--	+	++	--	++	++	+	++	--	++
Chuvoso	-	-	-	+	++	-	--	+	++	--	++	++	++	++	--	++
Seco	-	-	-	+	++	+	--	+	++	--	++	++	+	++	--	++

## 6 – CONCLUSÕES

### **Os resultados obtidos nessa pesquisa permitiram concluir que:**

Com o uso do *boxplot* foi possível identificar eventos extremos de precipitação e a relação com eventos de El Niño e La Niña, além do grau de influência da atuação de Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN). Também foi observado o comportamento médio a longo prazo, com tendências bem evidentes em algumas variáveis, como na razão de mistura, no vento, ATD e na temperatura mínima do ar, principalmente em Mandacaru;

A influência dos grandes investimentos financeiros pelo Estado na criação do Complexo Agroindustrial Juazeiro-Petrolina na década de 1990, alterando a dinâmica de cobertura e uso do solo na região, resultaram na mudança do comportamento padrão das variáveis atmosféricas;

A ampliação de áreas irrigadas e a implantação de novas tecnologias, favoreceu a diversificação de culturas e com isso, o progresso econômico na região. Porém, mudanças no uso da terra altera o ciclo hidrológico de uma região com influência significativa na disponibilidade dos recursos naturais e no clima local e regional;

A Amplitude Térmica Diária (ATD) tem influência no desenvolvimento das culturas, porém com diferentes níveis nas localidades analisadas. O padrão de comportamento das temperaturas máximas e mínimas, indica que, nem sempre, essa variável pode ser utilizada como indicador de mudanças climáticas;

Com os resultados da Análise de Regressão foi possível identificar séries com tendências positivas e negativas, significativas estatisticamente, porém, deve-se considerar que a tendência é diretamente influenciada pelo tamanho da série temporal analisada;

A aplicação dos testes de Mann-Kendall e de Pettitt permitiu mostrar períodos de tendências positivas e negativas, algumas vezes bastante significativas. Juntamente com a aplicação do sensoriamento remoto, esses testes mostraram-se eficientes em identificar mudanças importantes nas localidades analisadas;

Os resultados obtidos com a aplicação da Análise de Variância (ANOVA) mostraram mudanças significativas entre os dois grupos analisados, indicando a influência direta dos investimentos do Estado na década de 1990 na região;

Tendo em vista a vulnerabilidade da região semiárida do Nordeste brasileiro em se tornar uma área com características de deserto, é extremamente importante o monitoramento constante da

região, a partir do comportamento das variáveis atmosféricas em resposta às alterações ambientais do cultivo e uso da terra, buscando o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADDISU, S.; SELASSIE, Y. G.; FISSHA, G.; GEDIF, B. Time series trend analysis of temperature and rainfall in lake Tana Sub-basin, Ethiopia. **Environmental Systems Research**, v. 4, p. 25, 2015.
- AHMADI, F.; TAHROUDI, M. N.; MIRABBASI, R.; KHALILI, K.; JHAJIHARIA, D. Spatiotemporal trend and abrupt change analysis of temperature in Iran, **Meteorological Applications**, v. 25, p. 314-321, 2018.
- AMBRIZZI, T., SOUZA, E. B., PULWARTY, R. S. The Hadley and Walker regional circulations and associated ENSO impacts on the South American seasonal rainfall. **In:** Diaz HF, Bradley RS (eds) The Hadley circulation: present, past and future., v. 21. Kluwer, Dordrecht, p. 203–235, 2004. DOI:10.1007/978-1-4020-2944-8\_8
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Atlas Irrigação: **Uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2017. 86 p.
- ANDRADE, M. C. de. A terra e o homem no Nordeste: contribuição ao estudo da questão agrária no Nordeste. 7 ed. São Paulo – Cortez, 2005.
- ARAÚJO, G. J. F.; SILVA, M. M. Crescimento econômico no semiárido brasileiro: o caso do polo frutícola Petrolina/Juazeiro. **Caminhos de Geografia**, 14(46), 2013.
- ATER/CODEVASF. **Relatório anual**. Petrolina, PE, 2007.
- BACK, A. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 5, p. 717-726, Brasília-DF, 2001.
- BARBIERI, L. F. P.; CORREIA, M. F.; BRAGA, C. C.; GONÇALVES, W. A.; MOURA, M. S. B. Desempenho de método de estimativa da temperatura média diária: um estudo em áreas com forte pressão antrópica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 857-874, 2013.
- BARBIERI, L. F. P.; CORREIA, M. F.; SILVA ARAGÃO, M. R.; VILAR, R. A. A.; MOURA, M. S. B. Impacto of climate variations and land use change: a Mann-Kendall application. **Revista Geama**, v. 10, n. 1, p. 19-27, Recife-PE, 2017.

BARI, S. H.; RAHMAN, Md. T. U.; HOQUE, M. A.; HUSSAIN, Md. M. Analysis of seasonal and annual rainfall trends in the northern region of Bangladesh. **Atmospheric Research**, v. 176-177, 1 July- 1 August, p. 148-158, 2016.

BLAIN, G. C.; PICOLI, M. C. A.; LULU, J. Análises estatísticas das tendências de elevação nas séries anuais de temperatura mínima do ar no estado de São Paulo. **Revista Bragantia (online)**, v. 68, n. 3, p. 807-815, Campinas-SP, 2009.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (SECEX/MDIC). Disponível em: <http://infosecex.mdic.gov.br/>. Acesso em: 26 de maio de 2013.

CABRAL JÚNIOR, J.B. Estimativas, variabilidade e análise de tendência da evapotranspiração de referência em perímetros irrigados, no semiárido do Nordeste Brasileiro. 109p. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

CABRAL JÚNIOR, J.B.; SILVA, C.M.S.; DE ALMEIDA, H.A.; BEZERRA, B. G.; SPYRIDES, M. H. C. Detecting linear trend of reference evapotranspiration in irrigated farming areas in Brazil's semiarid region. **Theoretical and Applied Climatology**, p. 1-11, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02816-w>

CARPENEDO, C. B.; AMBRIZZI, T. Anticiclone subtropical do atlântico sul associado ao modo anular sul e impactos climáticos no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 4, p. 605-613, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786354006>

CORDEIRO NETO, J. R.; ALVES, C. L. B. Ruralidade no vale do submédio São Francisco: observações a partir da evolução econômica do polo Juazeiro-BA – Petrolina-PE. **Revista IDeAS**, v. 3, n. 2, p. 324-361, jul/dez, 2009.

CORREIA, M. F. Impacto das ações antrópicas no clima do submédio São Francisco: um estudo numérico e observacional. 181p. **Tese (Doutorado em Meteorologia)** – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

CORREIA, M. F. Variabilidade climática e geração de energia em regiões semiáridas: um estudo da vulnerabilidade ambiental em situações de cheias e secas extremas. **DCA/UFCG**, 2012 (Relatório final de pesquisa – CNPQ/PQ – N° 303627/2008-5).

CORREIA, M. F.; GONÇALVES, W. A.; SILVA ARAGÃO, M. R.; DINIZ, M. C. S. Mudanças na estrutura termodinâmica da atmosfera na presença de vórtices ciclônicos de altos

níveis: um episódio de precipitação extrema no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 4, p. 877-890, 2012. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v5i4.232865>

CORREIA, M. F.; SILVA DIAS, M. A. F. Variação do nível do reservatório de Sobradinho e seu impacto sobre o clima da região. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 157-168, 2003.

CORREIA, M. F.; SILVA DIAS, M. A. F.; SILVA ARAGÃO, M. R. Soil occupation and atmospheric variations over Sobradinho lake área. Part one: an observational analysis. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 94, p. 103-113, 2006a.

CORREIA, M. F.; SILVA DIAS, M. A. F.; SILVA ARAGÃO, M. R. Soil occupation and atmospheric variations over Sobradinho lake área. Part two: a regional modeling study. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 94, p. 115-128, 2006b.

CORREIA, M. F.; SILVA, F. S.; SILVA ARAGÃO, M. R.; SANTOS, E. P.; MOURA, M. S. B. Impacto da expansão agrícola na amplitude térmica diária em ambiente semiárido. VII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia. **Revista Ciência e Natura Especial**, 2009.

CORREIA, M.F.; SILVA, F.S.; SILVA ARAGÃO, M.R.; SANTOS, E.P.; MOURA, M.S.B. Impacto da expansão agrícola da amplitude térmica diária em ambiente semiárido. **Ciência e Natura**, Ed. Suplementar, p. 311-314, 2011.

CPTEC/INPE. Ocorrências de El Niño e La Niña. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 20 de outubro de 2020.

DA SILVA, T. G. F.; DE QUEIROZ, M. G.; ZOLNIER, S.; DE SOUZA, L. S. B.; DE SOUZA, C. A. A.; DE MOURA, M. S. B.; DE ARAÚJO, G. G. L.; STEIDLE NETO, A. J.; DOS SANTOS, T. S.; DE MELO, A. L.; DA CRUZ NETO, J. F.; DA SILVA, M. J.; ALVES, H. K. M. N. Soil properties and microclimate of two predominant landscapes in the Brazilian semiarid region: comparison between a seasonally dry tropical forest and a deforested area. **Soil & Tillage Research**, v. 207, p. 104852, 2021.

EKHTIARI, N.; GROSSMAN-CLARKE, S.; KOCH, H.; SOUZA, W. M.; DONNER, R. V.; VOLKHOLZ, J. Effects of the lake Sobradinho reservoir (Northeastern Brazil) on the regional climate. **Climate**, v. 5, n. 50, 2017. DOI: 10.3390/cli5030050.

FRANCHITO, S.H., FERNANDEZ, J. P. R., PAREJA, D. Surrogate climate change scenario and projections with a regional climate model: impact on the aridity in South America.

**American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 474–489, 2014. DOI: 10.4236/ajcc.2014.35041

GANDU, A. W.; SILVA DIAS, P. L. Impact of tropical heat sources on the South American tropospheric upper circulation and subsidence. **Journal of Geophysics Research**, v. 103, p. 6001-6015, 1998.

GRIMM, A. M. Verificação de alterações climáticas na área do lago de Itaipu. In: **V Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Rio de Janeiro, 1988.

HAJANI, E.; RAHMAN, A. Characterizing changes in rainfall: a case study for New South Wales, Australia. **International Journal of Climatology**, DOI: 10.1002/joc.5258, 2017.

INMPE/CPTEC. **CLIMANÁLISE – Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. v. 22, n. 01, 2007.

IPCC [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC, Geneva, Switzerland: (2014): 151.

IPCC. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: FIELD, C. B., BARROS, V. R., DOKKEN, D. J., MACH, K. J., MASTRANDREA, M. D., BILIR, T. E., CHATTERJEE, M., EBI, K. L., ESTRADA, Y. O., GENOVA, R. C., GIRMA, B., KISSEL, E. S., LEVY, A. N., MacCRACKEN, S., MASTRANDREA, P. R., WHITE, L. L. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, pp 1132, 2014.

IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: FIELD, C. B., BARROS, V., STOCKER, T. F., QIN, D., DOKKEN, D. J., EBI, K. L., MASTRANDREA, M. D., MACH, K. J., PLATTNER, G-K., ALLEN, S. K., TIGNOR, M., MIDGLEY, P. M. (eds) Cambridge University Press, Cambridge, pp 582, 2012.

KHOSRAVI, H.; SAHEDI-HOSSEINI, F.; NASROLLAHI, M.; GHARECHAEI, H. R. Trend analysis and detection of precipitation fluctuations in arid and semi-arid regions, **Desert**, v. 22, n. 1, p. 77-84, 2017.

LEITE, P. S. A luta pelo desenvolvimento regional e rural no mundo: relato de políticas e resultados em países visitados pelo autor. Fortaleza: **Banco do Nordeste do Brasil**, 2006.

LYRA, M. J. A.; ARRAUT, J. M. Análise termodinâmica de um vórtice ciclônico de altos níveis sobre o nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 43, n. 4, p. 302-309, 2020. DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2020\\_4\\_302\\_309](http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_302_309)

MAHFOUF, J. F.; RICHARD, E.; MASCART, P. The influence of soil and vegetation on the development of mesoscale circulations. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v.26, p. 1483-1553, 1987.

MARENGO, J. A. L.; BESERRA, E.; LACERDA, F. F. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. In: **Recursos Hídricos em Regiões Áridas e Semiáridas**. INSA-MCT, p. 383-422, Campina Grande-PB, 2011.

MARENGO, J. A., ALVES, L. M., SOARES, W. R., RODRIGUEZ, D. A., CAMARGO, H., RIVEROS, M. P., PABLÓ, A. D. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in Northeast Brazil. **Journal of Climatology**, v. 26, n. 22, p. 9137–9154, 2013. DOI:10.1175/JCLI-D-12-00642.1

MARENGO, J. A., BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/ drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Climate Change**, v. 129, p. 103–115, 2015. DOI:10.1007/s10584-014-1310-1

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in northeast Brazil – past, present and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 124, n. 3-4, 2016. DOI 10.1007/s00704-016-1840-8

MELLO, N. G. S.; SAKAMOTTO, M. S.; TORSANI, J. A. Estudo de caso de um sistema convectivo de mesoescala (SCM) observado no nordeste do Brasil. In: **IX Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Campos do Jordão-SP, v. 2, p. 887-890, 1996.

MELO, E. C. S. Simulações numéricas nas interações biosfera-atmosfera em área de caatinga: uma análise da expansão agrícola em ambiente semiárido. 135p. **Tese (Doutorado em Meteorologia)** – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2011.

MELO, E. C. S.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F. Regimes do vento à superfície na área de Petrolina, submédio São Francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 229-241, 2013.

MELO, M. M. M. S.; SANTOS, C. A. C.; OLINDA, R. A.; SILVA, M. T.; ABRAHÃO, R.; RUIZ-ALVAREZ, O. Trends in temperature and rainfall extremes near the artificial Sobradinho lake, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p. 426-440, 2018.

MILLÉO, C.; PLOSZAI, R.; MINE, M. R. M. Análise de tendências na série histórica de precipitações em Curitiba. In: **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Brasília-DF, 2015.

MORAIS, Y. C. B.; FRANÇA, L. M. A.; QUEIROZ, W. O.; SOUZA, W. M.; GALVÍNIO, J. D. Climate variability and extremes events occurrence in Petrolina-PE municipality. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 6, n. 4, p. 175-183, 2016. DOI: 10.5935/2237-2202.20160018

MORTATTI, J.; BORTOLETTO JÚNIOR, M. J.; MILDE, L. C. E.; PROBST, J. L. Hidrologia dos rios Tietê e Piracicaba: séries temporais de vazão e hidrogramas de cheia. **Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 12, n. 23, p. 55-67, 2004.

MURTEIRA, B.J.F. **Probabilidades e Estatística**. Editora McGraw-Hill de Portugal Lda., 1990.

NOGUEIRA, V. F. B. Expansão da soja no cerrado maranhense: uma análise da influência antrópica no clima regional. 145p. **Tese (Doutorado em Meteorologia)** – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2015.

NOGUEIRA, V. F. B.; CORREIA, M. F.; NOGUEIRA, V. S. Impacto do plantio de soja e do oceano pacífico equatorial na precipitação e temperatura na cidade de Chapadinha-MA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, p. 708-724, 2012.

OUHAMDOUCH, S.; BAHIR, M. Climate change impact on future rainfall and temperature in semi-arid areas (Essaouira basin, Marrocos), **Environmental Processes**, DOI 10.1007/s40710-017-0265-4, 2017.

PENEREIRO, J. C.; BADINGER, A.; MACCHERI, N. A.; MESCHIATTI, M. C. Distribuições de tendências sazonais de temperatura média e precipitação nos biomas brasileiros, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 97-113, 2018.

PENEREIRO, J. C.; GARCIA, V. F. Detecção de tendências hidroclimáticas interanual na bacia do rio São Francisco, **Revista DAE (Edição Especial)**, n. 208, v. 65, p. 88-107, 2017.

PENEREIRO, J. C.; MARTINS, L. L. S.; BERETTA, V. Z. Identificação de tendências sazonais dos regimes climático e hidrológico na bacia hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia, Brasil. **Revista Geografia Acadêmica**, v. 9, n. 1, p. 52-72, 2015.

PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. **Applied Statistics**, n. 28, p. 126-135, 1979.

PHILIP, A.; AUGUSTINE, Y.; ABINDAW, B. Impact of climate variability on smallholder households and indigenous coping strategies in Bonga district. **International Journal of Development Research**, v. 4, p. 693-699, 2014.

PINHEIRO, A.; GRACIANO, R. L. G.; SEVERO, D. L. Tendência das séries temporais de precipitação da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 281-290, 2013.

RAO, V. B., HADA, K., HERDIES, D. On the severe drought of 1993 in northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 15, n. 6, p.697–704, 1995. DOI:10.1002/joc.337015060

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite). In: **Proceedings Of The Third Ertis Symposium**, SP-351 Goddard Space Flight Center, 1973, Washington: NASA, 1973, p. 309–317.

RUBIN, D. B. Multiple imputation for nonresponse in surveys. New York: Wiley; 1987.

SÁ, I.I.S., MOURA, M.S.B., SÁ, I.B., GALVÍNCIO, J.D., RIBEIRO, J.G. Dinâmica da agricultura irrigada em uma área do vale do São Francisco utilizando técnicas de sensoriamento remoto. In: **XV CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, Aracajú-SE, julho, 2007.

SAIFULLAH, M.; LI, Z.; LI, Q.; ZAMAN, M.; HASHIM, S. Quantitative estimation of the impact of precipitation and land surface change on hydrological processes through statistical modeling. **Advances in Meteorology**, v. 2016, Article ID 6130179, 15 pages, 2016.

SAMPAIO, Y; SAMPAIO, E. V. S. B.; SOUZA, H, R. Agricultura irrigada no polo Petrolina-Juazeiro – impactos dos investimentos públicos e privados. In: SAMPAIO, E. V. S. B.; SAMPAIO, Y (Org.). Ensaio sobre a economia da fruticultura irrigada. Fortaleza, BNB, 2004.

SANTOS, C. A. C.; BRITO, J. I. B.; RAO, T. V. R.; MENEZES, H. E. A. Tendência dos índices de precipitação no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 39-47, 2009.

SANTOS, P. M.; VOLTOLINI, T. V.; CAVALCANTE, A. C. R.; PEZZOPANE, R. M.; MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F.; BETTIO, G. M.; CRUZ, P. G. Mudanças climáticas globais e a pecuária: cenários futuros para o semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, p. 1176-1196, 2011.

SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; ARAÚJO, H. A. Characteristic of C-band meteorological radar echoes at Petrolina, northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 20, p. 279-298, 2000.

SILVA PAZ, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; PEREIRA, F. A. C. Irrigação: tecnologia e produtividade. **Bahia Agrícola**, v. 5, n. 3, p. 30-37, 2003.

SILVA, A. P. N.; SOUZA, L. R.; CORREIA, M. F.; SILVA, B. B. Índices observacionais de ilha de calor urbana em Petrolina (PE). **Ciência e Natura**, v. esp., p. 315-318, 2011.

SILVA, P. C. G. da. Articulação de interesses públicos e privados no polo Petrolina-PE/Juazeiro-BA: em busca de espaço no mercado globalizado de frutas frescas. **Tese de Doutorado**. Instituto de Economia da UNICAMP. Campinas, 2001.

SNEYERS, R. Sur l'analyse statistique des series d'observations. Genève: **Organization Météorologique Mondiale**, 1975. 192p. (OMM Note Technique, 143).

SOBEL, T. F. Fruticultura e economia dos custos de transação: determinantes das estruturas de governança dos pequenos produtores do Polo Petrolina Juazeiro. 203p. **Tese (Doutorado em Economia)** – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2011.

TEIXEIRA, A. H. C. Informações agrometeorológicas do polo Petrolina-PE/ Juazeiro-BA. **Embrapa Semi-Árido**, Documentos 168, 46p, Petrolina-PE, 2001.

TUKEY, J. W. **Exploratory Data Analysis**. Reading, Mass., Addison-Wesley, 688 pp, 1977.

VALE, C. N. C. Microclima, umidade do solo, produção e qualidade da uva ‘Syrah’ sob diferentes sistemas de condução e porta-enxertos na safra do segundo semestre de 2015. 110p. **Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água)** – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN, 2015.

VIANEELLO, R. L.; ALVES, A. R. Meteorologia básica e aplicações, 2<sup>a</sup> ed. rev. amp., 460p., Viçosa, MG: Ed. UFV, 2012.

VIEIRA, R. M. S. P., TOMASELLA, J., ALVALA, R. C. S., SESTINI, M.F., AFFONSO, A. G., RODRIGUEZ, D. A., BARBOSA, A. A., CUNHA, A. P. M. A., VALLES, G. F., CREPANI, E., OLIVEIRA, S. B. P., SOUZA, M. S. B., CALIL, P. M., CARVALHO, M. A., VALERIANO, D. M., CAMPELLO, F. C. B., SANTANA, M. O. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, v. 6, p. 347–360, 2015. DOI:10.5194/se-6-347-2015

VILAR, A. A. R.; CORREIA, M. F.; NÓBREGA, R. S.; ARAGÃO, M. R. S.; BARBIERI, L. F. P.; MOURA FILHO, M. G. Avaliação do impacto de secas severas no Nordeste brasileiro na geração de energia elétrica através do modelo Newave: projeção das energias afluentes e armazenadas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 89-98, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786351004>.