

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

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS NO ESTADO DA PARAÍBA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

VALDO FERNANDES CAVALCANTE

Campina Grande - PB

Agosto - 2018

VALDO FERNANDES CAVALCANTE

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS NO ESTADO DA PARAÍBA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Meteorologia Agrícola e Micrometeorologia.

Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Orientador

Campina Grande - PB

Agosto - 2018

C376e Cavalcante, Valdo Fernandes.
Evapotranspiração de referência no contexto das mudanças climáticas no estado da Paraíba / Valdo Fernandes Cavalcante. - Campina Grande-PB, 2018.
94 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2018.
"Orientação: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva".
Referências.

1. Climatologia do Nordeste. 2. Imputação de Dados. 3. Meteorologia - Análise de Tendência. I. Silva, Bernardo Barbosa da. II. Título.

CDU 551.58(043)

VALDO FERNANDES CAVALCANTE

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS NO ESTADO DA PARAÍBA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 30/08/2018

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. FRANCISCO DE ASSIS SALVIANO DE SOUSA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JOSÉ DANTAS NETO
Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Campina Grande

Os rios que eu encontro
vão seguindo comigo.
Rios são de água pouca,
em que a água sempre está por um fio.
Cortados no verão
que faz secar todos os rios.
Rios todos com nome
e que abraço como a amigos.
Uns com nome de gente,
outros com nome de bicho,
uns com nome de santo,
muitos só com apelido.
Mas todos como a gente
que por aqui tenho visto:
a gente cuja vida
se interrompe quando os rios.

(João Cabral de Melo Neto)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus e a nossa Mãe, pelo dom da vida, pelos direcionamentos e força dada nesta minha caminhada.

À esta instituição de ensino por proporcionar o ambiente de aprendizado. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão de bolsa de pesquisa

Ao professor orientador Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva, pelas contribuições e pela convivência.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia, por disponibilizar o Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa.

Aos colegas de curso, minha família e todos que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho.

À todos que compõem a secretaria do curso, a coordenação do curso e, principalmente, aos professores.

À minha namorada por ter-me incentivado e me apoiado nessa caminhada.

“Ora, a fé é a certeza de coisas
que se esperam, a convicção de fatos que não se veem.”

(Hebreus 11.1)

RESUMO

As mudanças ocorridas nas condições climáticas têm importantes implicações sobre regiões áridas e semiáridas, como o Nordeste brasileiro, podendo afetar especialmente a demanda de água. Para avaliar essas mudanças, foram utilizados dados diários de velocidade do vento a 2 metros de altura, temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa média e insolação diária, sendo estas as principais variáveis responsáveis pelo incremento da evapotranspiração de referência - ETo. As unidades de estudo são as localidades de São Gonçalo, Patos, Monteiro, Campina Grande, Areia e João Pessoa. Considerou-se um período de aproximadamente 18.250 dias com dados diários compreendidos entre 1966 – 2016, obtidos nas estações convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), distribuídas no estado da Paraíba. Os dados supracitados foram utilizados para calcular os valores da ETo e para realizar as análises de tendências para as variáveis climáticas e a ETo na escala anual e sazonal. A metodologia adotada foi a verificação da consistência dos dados meteorológicos, que resultou na comparação de diferentes metodologias estatísticas que se utilizam de técnicas multivariadas para o preenchimento de falhas de dados meteorológicos diários. A análise de tendência foi realizada por meio do teste não paramétrico de Mann-Kendall e a determinação do ponto de mudança através do estimador de declive de Sen. O método FAO-Penman-Monteith foi utilizado para o cálculo da ETo. Verificou-se que houve tendência de elevação na ETo na escala anual, nas localidades de Monteiro, Campina Grande e João Pessoa; já na escala sazonal todas as localidades apresentaram tendência de elevação na ETo na maior parte das estações do ano, com exceção de Patos e Areia. As tendências tornaram-se significativas a partir dos anos de 1970 e 1980 para as localidades de Monteiro, Campina Grande e João Pessoa.

Palavras-chave: Climatologia do Nordeste. Imputação de dados. Análise de tendência.

ABSTRACT

Changes in climatic conditions have important implications for arid and semi-arid regions, such as the Brazilian Northeast, which may affect water demand in particular. To evaluate these changes, daily data of wind velocity at 2 meters height, maximum temperature, minimum temperature, average relative humidity and daily sunshine were used, these being the main variables responsible for the increase of reference evapotranspiration - ETo. The units of study are the localities of São Gonçalo, Patos, Monteiro, Campina Grande, Areia and João Pessoa. It was considered a period of approximately 18,250 days with daily data from 1966 to 2016, obtained in the conventional stations of the National Institute of Meteorology (INMET), distributed in the state of Paraíba. The aforementioned data were used to calculate the ETo values and to perform the trend analysis for the climatic variables and the ETo on the annual and seasonal scale. The methodology adopted was to verify the consistency of the meteorological data, which resulted in the comparison of different statistical methodologies that use multivariate techniques to fill in daily meteorological data. The trend analysis was performed using the Mann-Kendall non-parametric test and the change point determination using the Sen slope estimator. The FAO-Penman-Monteith method was used to calculate ETo. It was verified that there was a tendency of elevation in the ETo in the annual scale, in the localities of Monteiro, Campina Grande and João Pessoa; already in the seasonal scale all the localities presented tendency of elevation in the ETo in most of the seasons of the year, with exception of Ducks and Sand. The trends became significant from the 1970s and 1980s to the locations of Monteiro, Campina Grande and Joao Pessoa.

Keywords: Climatology of the Northeast. Imputation of data. Trend analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representando a evapotranspiração. Fonte: Allen et al. (1998)..	211
Figura 2 - Esquema representado a evapotranspiração de referência. Fonte: Allen et al. (1998).....	22
Figura 3 - Mesorregiões do Estado de Paraíba. Fonte: Adaptado do Atlas Nacional do Brasil (IBGE, 2010)).....	31
Figura 4 - Tipos de climas do estado da Paraíba, segundo a classificação de Köppen (Adaptado do atlas Geográfico da Paraíba, 2002)	322
Figura 5 - Localização geográfica das estações meteorológicas no estado da Paraíba. Fonte: Google Earth (2016)	344
Figura 6 - Erro absoluto médio (EAM) para as três abordagens de imputação, aplicadas a variáveis diárias de temperatura máxima, temperatura mínima, insolação, humidade relativa e velocidade do vento no cenário (período com 90 dias removidos).....	48
Figura 7 - Índice de concordância de Willmott (d) para as três abordagens de imputação, aplicadas a variáveis diárias de temperatura máxima, temperatura mínima, insolação, humidade relativa e velocidade do vento no cenário (período com 90 dias removidos)	49
Figura 8 - Séries temporais de (Tmax) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de São Gonçalo, Patos e Monteiro para o período de 1966 a 2016, com exceção de Patos que vai de 1975 a 2016.	53
Figura 9 - Séries temporais de (Tmax) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de Campina Grande, Areia e João Pessoa para o período de 1966 a 2016, com exceção de areia que vai de 1993 a 2016.	54
Figura 10 - Séries temporais de (Tmin) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de São Gonçalo, patos e	

monteiro para o período de 1966 a 2016, com exceção de Patos que vai de 1975 a 2016	58
Figura 11 - Séries temporais de (Tmin) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de Campina Grande, Areia e João Pessoa para o período de 1966 a 2016, com exceção de Patos que vai de 1975 a 2016	58
Figura 12 - Séries temporais de (n) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de São Gonçalo, patos e monteiro para o período de 1966 a 2016, com exceção de Patos que vai de 1975 a 2016.	60
Figura 13 - Séries temporais de (n) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de Campina Grande, Areia e João Pessoa para o período de 1966 a 2016, com exceção de areia que vai de 1993 a 2016..	61
Figura 14 - Séries temporais de (UR) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de São Gonçalo, patos e monteiro para o período de 1966 a 2016, com exceção de Patos que vai de 1975 a 2016.....	63
Figura 15 -Séries temporais de (UR) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de Campina Grande, Areia e João Pessoa para o período de 1966 a 2016, com exceção de areia que vai de 1993 a 2016.....	64
Figura 16 - Séries temporais de (U2) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de São Gonçalo, patos e monteiro para o período de 1966 a 2016, com exceção de Patos que vai de 1975 a 2016.....	67

Figura 17- Séries temporais de (U2) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de Campina Grande, Areia e João Pessoa para o período de 1966 a 2016, com exceção de areia que vai de 1993 a 2016.....68

Figura 18 - Séries temporais de ETo com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de São Gonçalo, Patos e Monteiro para o período de 1966 a 2016, com exceção de Patos que vai de 1975 a 201672

Figura 19 - Séries temporais de ETo com as médias anuais no período do verão (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha azul) para as localidades de Campina Grande, Areia e João Pessoa para o período de 1966 a 2016, com exceção de Areia que vai de 1993 a 2016.....73

Figura 20 - Boxplot sazonal da ETo média diária (mm/dia) para os localidades de São Gonçalo, Patos, Monteiro, Campina Grande, Areia e João Pessoa para o período de 1966 a 2016, com exceção de Areia que vai de (1993 a 2016) e Patos que vai de (1975 a 201676

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de localização geográfica das estações meteorológicas. Fonte: INMET (2016).....	33
Tabela 2 - Quantidade de dados faltantes e porcentagem por localidade	43
Tabela 3 - Quantidade de dados mensais válidos para cada variável meteorológica, Tmax, Tmin, n, U ₂ e UR por localidade.....	43
Tabela 4 - Quantidade de dados válidos para cada variável meteorológica, Tmax, Tmin, n, U ₂ e UR por localidade e escala temporal	44
Tabela 5 - Resultado do teste de homogeneidade (run test) para as séries anuais dos parâmetros meteorológicos e ETo para os municípios de João Pessoa, Monteiro, Areia, Campina Grande, Patos e São Gonçalo (1966 – 2016), excerto patos que vai de 1975 – 2016.	46
Tabela 6 - Valores médios de cada variável meteorológica, Tmax, Tmin, ns, U ₂ e UR por localidade e escala temporal.....	46
Tabela 7 - Ilustração de dados a serem imputados, representados por NA, referentes a temperatura máxima, temperatura mínima, insolação, umidade relativa e velocidade do vento a 2 metros de altura para a estação de São Gonçalo (a) e os dados imputados (b). Os dados com falhas (São Gonçalo) estão ao lado da estação próxima com dados completos (Patos).	50
Tabela 8 - Teste estatístico de Mann-Kendall (Z) e do estimador de Sen (magnitude) aplicados às séries temporais anuais e sazonais da temperatura máxima (Tmax) para João pessoa, Areia, Campina Grande, Monteiro, patos e São Gonçalo, considerando nível de 5% de significância (p-valor <0,05) para o período de 1966 a 2016, excerto Areia que vai de 1993 a 2016 e Patos que vai de 1975 a 2016.	55
Tabela 9 - Teste estatístico de Mann-Kendall (Z) e do estimador de Sen (magnitude) aplicados às séries temporais Anuais e sazonais da temperatura mínima (Tmin) para João pessoa, Areia, Campina Grande, Monteiro, patos e São Gonçalo, considerando nível de 5% de significância (p-valor <0,05) para o período de 1966 a 2016, excerto Areia que vai de 1993 a 2016 e Patos que vai de 1975 a 2016.	59
Tabela 10 - Teste estatístico de Mann-Kendall (Z) e do estimador de Sen (magnitude) aplicados às séries temporais Anuais e sazonais de insolação (n) para João pessoa, Areia, Campina Grande, Monteiro, patos e São Gonçalo, considerando	

nível de 5% de significância (p-valor <0,05) para o período de 1966 a 2016, excerto Areia que vai de 1993 a 2016 e Patos que vai de 1975 a 2016.	62
Tabela 11 - Teste estatístico de Mann-Kendall (Z) e do estimador de Sen (magnitude) aplicados às séries temporais Anuais e sazonais da umidade relativa (UR) para João pessoa, Areia, Campina Grande, Monteiro, patos e São Gonçalo, considerando nível de 5% de significância (p-valor <0,05) para o período de 1966 a 2016, excerto Areia que vai de 1993 a 2016 e Patos que vai de 1975 a 2016.	65
Tabela 12 - Teste estatístico de Mann-Kendall (Z) e do estimador de Sen (magnitude) aplicados às séries temporais Anuais e sazonais da velocidade do vento a 2 m de altura para João pessoa, Areia, Campina Grande, Monteiro, patos e São Gonçalo, considerando nível de 5% de significância (p-valor <0,05) para o período de 1966 a 2016, excerto Areia que vai de 1993 a 2016 e Patos que vai de 1975 a 2016.	69
Tabela 13 - Teste estatístico de Mann-Kendall (Z) e do estimador de Sen (magnitude) aplicados às séries temporais média anuais da ETo para João pessoa, Areia, Campina Grande, Monteiro, patos e São Gonçalo, considerando nível de 5% de significância (p-valor <0,05) para o período de 1966 a 2016, excerto Areia que vai de 1993 a 2016 e Patos que vai de 1975 a 2016.	74
Tabela 14 - Teste estatístico de Mann-Kendall (Z) e do estimador de Sen (magnitude) aplicados às séries temporais sazonais da ETo para João pessoa, Areia, Campina Grande, Monteiro, patos e São Gonçalo, considerando nível de 5% de significância (p-valor <0,05) para o período de 1966 a 2016, excerto Areia que vai de 1993 a 2016 e Patos que vai de 1975 a 2016.	77
Tabela 15 - Valores médios da ETo entre 1966 e 2016, excerto Patos que vai de 1975 a 2016 e Areia que vai de 1993 a 2016 por localidade e escala temporal.	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência.....	26
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ASD	Áreas Suscetíveis à Desertificação
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
E	Evaporação
EEA	Agência Ambiental Europeia
ET	Evapotranspiração
ET _c	Evapotranspiração da cultura
ET _o	Evapotranspiração de referência
ET _p	Evapotranspiração potencial
ET _r	Evapotranspiração real
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
IAF	Índice de área foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
K _c	Coeficiente de cultura
MK	Teste de Mann-Kendall
MTSDI	Multivariate Time Series Data Imputation
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PM	Método de Penman-Monteith
PM-FAO	Método de Penman-Monteith da FAO

LISTA DE SÍMBOLOS

As'	clima tropical chuvoso com chuvas de outono-inverno
B	coeficiente linear do método de Sen
BSh	clima semiárido estépico quente de baixas latitude e altitude
e_a	pressão parcial de vapor d'água
e_s	pressão de saturação do vapor d'água
$(e_s - e_a)$	déficit de pressão de vapor d'água atmosférico
EM	Expectation Maximisation
ET_o	evapotranspiração de referência
$f(t)$	função contínua monótona
G	fluxo de calor no solo
H_0	hipótese nula
H_1	hipótese alternativa
i, j	momentos específicos
m	número de grupos com valores iguais
N	número de inclinações encontradas no método de Sen
n	número de dados
n_s	tempo total de insolação
Q	coeficiente angular do método de Sen
RH_{mean}	umidade relativa média
R_n	saldo de radiação
R_s	radiação solar
S	variável do teste estatístico
Snl	função de sinal
t_i	número de pontos no grupo i
T	temperatura
T_{avg}	média entre os extremos de temperatura do ar a 2 metros de altura
T_{max}	temperatura máxima do ar a 2 metros de altura
T_{min}	temperatura mínima do ar a 2 metros de altura
u_2	velocidade média do vento a 2 metros de altura
UR	umidade relativa
Var	variância

x_i, x_j	valor amostral da variável X
X	variável aleatória
Z_S	teste estatístico padronizado
α	nível de significância estatística
β	probabilidade de ocorrência do Erro Tipo II
γ	constante psicrométrica
Δ	declividade da curva temperatura-pressão de vapor na saturação
ε_i	diferença residual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVOS	200
2.1 Objetivo Geral	200
2.2 Objetivos Específicos	200
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	211
3.1 Evapotranspiração	211
3.1.1 Evapotranspiração de referência.....	222
3.1.2 Estimativas da evapotranspiração de referência.....	244
3.1.3 Tipos de métodos para calcular ETo.....	255
3.2 As mudanças climáticas e a evapotranspiração.....	288
3.3 Métodos de preenchimento de falhas	289
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	311
4.1 Material.....	311
4.1.1 Área de estudo	311
4.1.2 Séries temporais de dados meteorológicos.....	333
4.2 Métodos.....	344
4.3 Processamentos de dados	344
4.4 Método de Penman-Monteith-FAO.....	35
4.5 Teste de Mann-Kendall	39
4.6 Estimador de Inclinação de Sen.....	411
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	422
5.1 Teste de homogeneidade.....	42
5.2 Preenchimento de falhas nas séries temporais	47
5.3 ANÁLISE DE TENDÊNCIAS	471
5.3.1 Temperatura máxima	511
5.3.2 Temperatura mínima	555

5.3.3 Insolação	59
5.3.4 Umidade relativa média	622
5.3.5 Velocidade do vento	666
5.3.6 Análise anual da Evapotranspiração de Referência	69
5.3.7 Análise sazonal da Evapotranspiração de Referência	744
6 CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas e suas implicações no clima vêm sendo abordadas em vários estudos. Segundo a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC), em seu Artigo 1º, as mudanças climáticas são definidas como “uma mudança do clima que é atribuída direta ou indiretamente à atividade humana, que altera a composição da atmosfera mundial e que vai além da variabilidade climática natural observada ao longo de períodos comparáveis”. Assim, uma diferenciação entre as mudanças climáticas atribuídas às atividades humanas que alteram a composição atmosférica e a variabilidade do clima atribuída a causas naturais é de fundamental importância.

Nas últimas décadas, a ocorrência de impactos das mudanças climáticas ligadas às atividades e processos naturais, como aqueles realizados pelo homem, têm afetado progressivamente o nosso planeta, pois cada uma das três últimas décadas tem se revelado gradualmente mais quente que qualquer década anterior desde 1850. Entre 1880 e 2012, a temperatura do ar média global observada mostrou um aumento de 0,85°C e se prevê que essa tendência continuará sendo positiva no período 2016-2035. Com isso, ocorreria uma variação média entre 0,3°C e 0,7°C maior do que a sofrida entre 1986 e 2005, segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014).

As mudanças climáticas e seus potenciais efeitos sobre o ciclo hidrológico estão contribuindo para o aumento das incertezas consideráveis nas demandas e ofertas futuras de água doce (MIDDELKOOP et al., 2001), e alguns fatores como a qualidade e quantidade de água em bacias, incluindo variações nas taxas de evapotranspiração (FAN & SHIBATA, 2015), podem ser significativamente alterados.

É possível observar tendências de mudanças nas temperaturas, nos totais anuais de precipitação, no número de dias secos consecutivos, na oferta hídrica e nos processos de desertificação. As diferenças encontradas nas tendências e índices analisados, mesmo entre estações relativamente próximas entre si, fortalecem o entendimento das alterações nos regimes climáticos como tendo um forte aspecto regional.

O Governo do Estado da Paraíba (2011) alerta que este estado é um dos mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas no Brasil e que vem sofrendo com

o agravamento das secas no Sertão e no Agreste. Considera-se que, dos 223 municípios existentes no estado, 208 estão enquadrados nas áreas suscetíveis à desertificação (ASD) e que mais de 90% do seu território se encontra em áreas de ocorrência de secas e em áreas com risco de desertificação. Grande parte das terras desertificadas ou que estão em risco de desertificação na Paraíba tem como causa o desmatamento excessivo, o super-pastejo, o uso inadequado da irrigação e, em algumas áreas, as práticas de mineração. Na base desses problemas, pode-se destacar alguns fatores como, por exemplo, o pequeno acesso aos conhecimentos e às tecnologias que geram usos mais sustentáveis dos solos entre outros, segundo o Governo do Estado da Paraíba (2011).

Vários relatórios de órgãos internacionais importantes, como os da Agência Ambiental Europeia (EEA, 2011, 2014), asseveram a importância do planejamento e gestão dos recursos hídricos para atender vários interesses frente aos impactos decorrentes das mudanças climáticas. Esses documentos propõem estratégias e disseminam conhecimentos relacionados ao tema. Com relação às estratégias, pode-se destacar a redução das diferenças entre demanda e fornecimento, desde a redução das perdas por fatores não climáticos, bem como a adoção de tecnologias mais eficientes no uso e no plano de economia da água.

As estimativas regionais precisas de evapotranspiração (ET) e sua variabilidade espacial têm um papel importante na análise, no entendimento e principalmente na projeção dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos (IRMAK et al., 2012; BLACKIE & SIMPSON, 1993). Segundo Toríbio (1992), em média aproximadamente 57% da precipitação anual do mundo voltam à atmosfera pela evapotranspiração. Esse valor pode chegar bem próximo de 100% em áreas áridas ou desérticas. Além disso, de toda a precipitação que ocorre nos continentes, 57 % evaporam, enquanto que nos oceanos a evaporação corresponde a 112% do total precipitado.

Estudos que avaliam as tendências de variação da evapotranspiração de referência (ET_o) com as mudanças climáticas têm produzido resultados variados. Com isso investigar-se-á a ET_o em diversas regiões do estado da Paraíba no contexto das mudanças climáticas, a fim de se aferir possíveis alterações que algumas variáveis climáticas utilizadas no cálculo da ET_o pelo método padrão da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), podem

sofrer. É o caso específico das temperaturas extremas, velocidade do vento e da radiação solar, variáveis climáticas que mais influenciam no cálculo da ETo. Observar-se-á também o comportamento da ETo nas possíveis tendências, assim como o comportamento de todas as variáveis climáticas envolvidas no cálculo da ETo, utilizando-se do método FAO-Penman-Monteith (PM-FAO).

Nesse sentido, se investiga se as mudanças climáticas afetam a ETo no estado da Paraíba.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar as possíveis alterações na evapotranspiração de referência no estado da Paraíba, a partir da investigação da existência de tendência de variação de evapotranspiração e nas principais variáveis meteorológicas determinantes da ETo, no contexto das mudanças climáticas.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o comportamento sazonal e anual de ETo no período 1966-2016 para as estações localizadas nas cidades paraibanas de Areia, Campina Grande, João Pessoa, Monteiro, Patos e São Gonçalo.
- Testar em escalas sazonal e anual a existência de tendência nas séries da ETo e das variáveis meteorológicas que a influenciam e quantificar a taxa de variação anual de tais parâmetros, no caso de se constar sua existência.
- Avaliar, pormenorizadamente, o preenchimento de falhas e homogeneização das séries temporais de dados climáticos relacionados no cômputo da ETo.
- Empregar teste de tendência e imputação de dados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Evapotranspiração

A evapotranspiração varia de acordo com a própria atividade fisiológica das plantas, que é variável durante o ano todo e depende das plantações, da insolação, temperatura e condições climáticas de maneira geral.

Allen et al. (1998) definem a evapotranspiração como resultante da combinação de dois processos distintos, pelos quais a água é perdida tanto pela superfície do solo, por evaporação, como pela vegetação, por transpiração. A evaporação é pois o processo pelo qual a água no estado líquido é convertida em vapor de água. Já a transpiração consiste na vaporização da água no estado líquido que está contida nos tecidos vegetais e sua transferência para a atmosfera. A água, por sua vez, é absorvida, juntamente com nutrientes, pelas raízes e parte substancial dela retorna a atmosfera por esse importante processo, como mostra o esquema abaixo.

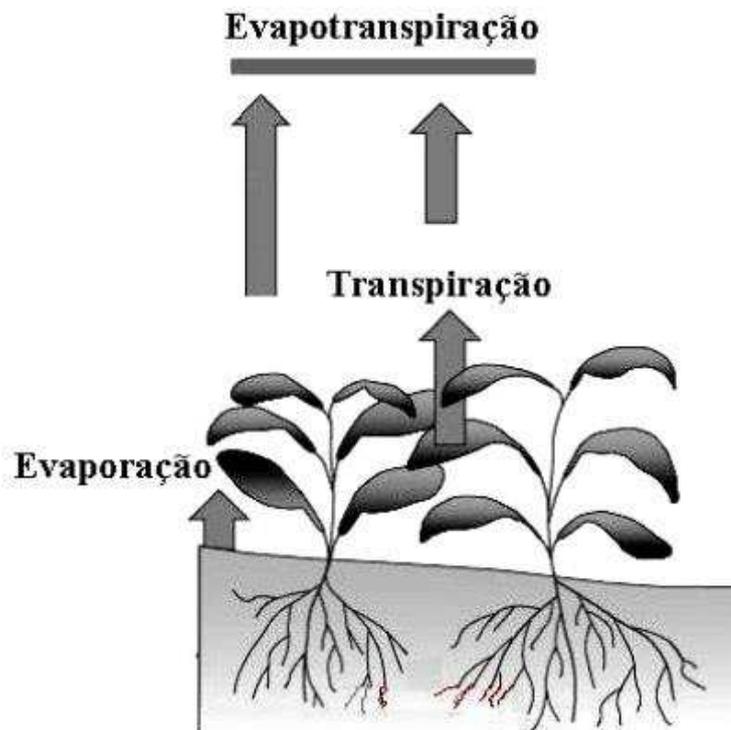


Figura 1 - Esquema representando a evapotranspiração. Fonte: Allen et al. (1998)

3.1.1 Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência (ET_o), segundo Smith (1991), corresponde a perda de água de uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cobertura ao transporte de vapor d'água igual a 69 s m^{-1} , que representaria a evapotranspiração de um gramado verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo, e sem falta de água. Já a evapotranspiração real (ER) é aquela que ocorre numa superfície vegetada, independentemente de sua área, de seu porte e das condições de umidade do solo. Logo, ER é aquela que ocorre em qualquer circunstância, sem imposição de qualquer condição de contorno. A ER pode ser limitada tanto pela disponibilidade da radiação solar como pelo suprimento de umidade pelo solo (PEREIRA et al., 1997).

Ao se considerar que a evapotranspiração real de uma dada cultura pode ser obtida a partir da combinação da evapotranspiração de referência (ET_o) com o seu coeficiente de cultura, estando a mesma em condição padrão (ALLEN et al., 1998) de disponibilidade hídrica adequada, o entendimento das variações espaciais e temporais da ET_o torna-se um componente indispensável em estudos hidrológicos regionais, projetos de sistemas de irrigação e planejamento de recursos hídricos (RUSSO, 1983; DOLMAN, 1992; HUO et al., 2013).

A evapotranspiração de referência - ET_o expressa o poder evaporativo da atmosfera em localização e tempo específicos. Os seus valores, obtidos em diferentes localidades ou períodos, são comparáveis pois se referem à evapotranspiração de uma superfície de referência, que seja uma extensa superfície de grama verde de altura uniforme, crescendo ativamente e adequadamente irrigada (ALLEN et al., 1998).



Figura 2 - Esquema representado a evapotranspiração de referência. Fonte: Allen et al. (1998)

A radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa e ETo são variáveis hidroclimáticas que sofrem diretamente ou indiretamente com os impactos das mudanças da temperatura do ar. A evapotranspiração está diretamente ligada a essas variáveis, supra mencionadas, e qualquer mudança nas mesmas poderá influenciar a ETo, que pode representar mais de 90% do uso da água em ecossistemas agrícolas e uma parcela significativa em outros ecossistemas. A estimativa precisa da ET por estudos que avaliem o impacto das mudanças climáticas sobre o balanço hídrico tem um papel crítico no entendimento e na projeção desses impactos nos recursos hídricos (IRMAK et al., 2012).

Nesse contexto, a irrigação é uma das atividades que devem ser vistas dentro do contexto de gestão dos recursos hídricos de uma bacia com vistas aos aspectos qualitativos e quantitativos da água em seus múltiplos usos. Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2015), a irrigação é responsável por aproximadamente 72% da vazão total consumida no Brasil e cuja demanda se baseia nas necessidades hídricas das culturas, que dependem diretamente da evapotranspiração de referência. Ao mesmo tempo em que a irrigação mais que dobra a produtividade agrícola em todo o mundo, cerca de um terço das terras irrigadas tem produtividade reduzida por administrações inadequadas de irrigação, que causam alagamentos e salinização (KHAN et al., 2006).

Mudanças climáticas vão ampliando os riscos existentes e criarão novos riscos para a natureza e humanidade. Esses riscos se distribuem de forma desigual e são normalmente maiores para as pessoas e comunidades menos favorecidas em países com qualquer nível de desenvolvimento (IPCC, 2014). Segundo relatórios do IPCC (MAGRIN et al., 2007) e do INPE (MARENGO et al., 2007; AMBRIZZI et al., 2007), o Semiárido brasileiro tenderá a tornar-se mais árido. Algumas projeções indicam que a frequência e a intensidade das secas podem aumentar, o que reduzirá a disponibilidade dos recursos hídricos. Isso causaria impacto em diversas áreas como, por exemplo, muitas culturas agrícolas, a biodiversidade e as atividades que dependem dos recursos naturais. Entre as consequências dessas mudanças, estão os impactos sobre a alimentação e a saúde da população local. “Mais de 70% das cidades do Semiárido brasileiro, com população acima de cinco mil habitantes, enfrentarão crise no abastecimento de água para o consumo humano até 2025,

independentemente da transposição do rio São Francisco, concluiu um estudo feito pela Agência Nacional de Águas (ANA)” (MARENGO, 2008). O Instituto Nacional do Semiárido (INSA) alerta que a Paraíba é o estado brasileiro mais afetado, proporcionalmente, pela desertificação, processo de degradação ambiental que torna as terras inférteis e improdutivas.

O impacto nos processos hidrometeorológicos no Nordeste brasileiro, especificamente no estado da Paraíba, tem sido apontado em diversos estudos recentes (ASSIS, 2012; SILVA, 2013; SOUZA; AZEVEDO, 2012; SANTOS; SANTOS; COUTINHO, 2013; SANTOS; ASSIS; SOUZA, 2014; LACERDA et al., 2009; MARENGO, 2008; NOBRE, 2011). Alguns destes, que avaliaram os impactos das mudanças climáticas nas taxas de evapotranspiração, chegaram a observar tendências na ETo, por vezes contrárias, ao aumento esperado na temperatura do ar (TANG et al., 2011; IRMAK et al., 2012).

3.1.2 Estimativas da evapotranspiração de referência

Evapotranspiração é um assunto trivial do ponto de vista teórico, porém, no lado prático das medições, torna-se bastante complexo e difícil. Essa dificuldade, nem sempre consciente de medida adequada da evapotranspiração, faz com que inúmeros autores rejeitem métodos conceituados e acurados de estimativas da evapotranspiração, principalmente em regiões carentes de dados meteorológicos.

De acordo com Allen (2008), avaliação e correção dos dados meteorológicos são essenciais para calcular valores precisos e representativos da evapotranspiração de referência. Entre as recomendações estão o conhecimento da localização da estação, tipo e exposição dos sensores usados, procedimentos de manutenção e calibragem dos equipamentos, procedimentos de controle de qualidade e/ou ajustes previamente realizados nos dados, disponibilidade de dados a pequenos intervalos para auxiliar o controle de qualidade, experiência do operador da estação e/ou recomendações com respeito ao uso dos dados para quantificação da ETo. Além destas, são recomendados procedimentos aplicáveis a várias circunstâncias, conforme os sugeridos por Walter et al. (2000), para avaliação e correção de dados de radiação, umidade e temperatura do ar e velocidade do vento.

Recomenda-se, ainda, que se busquem contribuições locais para avaliação e correção de dados.

No tocante à avaliação das mudanças climáticas, vários estudos têm produzido uma grande variedade de resultados e conclusões sobre as tendências da evapotranspiração para localidades específicas. Pode-se entender que uma das razões para os resultados inconsistentes é o fato de que, mesmo havendo disponibilidade de equações precisas e robustas baseadas fisicamente no balanço de energia, alguns desses estudos utilizam equações empíricas baseadas tão somente em temperatura e/ou radiação solar, que não levam em conta outros parâmetros climáticos críticos como saldo de radiação, velocidade do vento e déficit de pressão de vapor, provavelmente fornecendo tendências e valores que não representam o comportamento real da ETo (IRMAK et al., 2012). Notadamente, as equações empíricas normalmente são válidas apenas sob circunstâncias, localidades e períodos de tempo específicos. Então, na análise de tendências, essas equações precisam ser calibradas ao longo do período de estudo.

Atualmente, o método padronizado recomendado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) é uma adaptação do Método de Penman-Monteith (PM), doravante denominado Método da FAO-Penman-Monteith (PM-FAO). Este método considera que a evapotranspiração de referência incorpora os aspectos aero e termodinâmicos, incluindo na sua dedução a resistência ao fluxo de calor sensível e vapor da água (FERNANDES et al., 2001).

3.1.3 Tipos de métodos para calcular ETo

Métodos empíricos são resultados de correlações entre a evapotranspiração medida em condições padronizadas e os elementos meteorológicos medidos em estações meteorológicas padrão. Alguns desses métodos têm aplicação quase universal, como é o caso do método de Penman-Monteith-FAO (PM-FAO). Observa-se agora uma abordagem atual de alguns métodos empíricos de estimativas da ETo.

Quadro 1 - Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência

(Continua)

Método	Referências	Elemento meteorológicos de entrada ¹	Observações
Penman (PEN)	Penman (1948), Yoder et al.(2005)	T _x , T _n , T, UR, v, n, P, R _s , R _n	Conhecido também por Penman Original.
Thomthwaite (TW)	Thornthwaite (1948)	T _{mn} , T _m , T	Estimativa da ET _p , em escala mensal (mm mês ⁻¹). Utilizando-se T, pode-se estimar a ET _p ou ET _o , em escala diária, desde que o resultado seja dividido pelo número de dias do respectivo mês - este critério pode ser válido para todos os métodos cujo resultado seja apresentado em mm mês ⁻¹ .Turc (TC). Yoder et al. (2005)
Turc (TC)	Yoder et al. (2005), Trajkovic & Kolakovic (2009), Tabari (2010)	T, UR, R _s	-
Penman-Monteith (PM-FAO)	Allen et al. (1998)	x, T _n , T, UR, v, n, P, R _s , R	Também conhecido por Penman Monteith FAO 56.
Tanque Classe A (TCA)	Doorenbos & Pruitt (1977), Allen et al. (1998), Barros et al. (2009)	ECA, v, UR	-
Blaney-Criddle (BC)	Doorenbos & Pruitt (1977), Pereira et al. (1997), López-Urrea et al. (2006)	T _m , UR _{mín} , n, v	Também conhecido por Blaney-Criddle FAO 24. Todos os dados de entrada em médias mensais. Estimativa da ET _o em escala mensal (mm mês ⁻¹). Com DJ e Lat, pode-se estimar o parâmetro "p" sem uso de tabela. Ver, também, observação do método TW, para estimativa da ET _o em escala diária.
Radiação Solar (RS)	Doorenbos & Pruitt (1977), Pereira et al. (1997)	T, v, UR, R _s , P	Também conhecido por Radiação Solar FAO 24. É uma adaptação ao método MK. As observações são as mesmas para o método de MK. Acrescenta-se P, para a obtenção do parâmetro "W".

Quadro 2 - Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência

(Continuação)

Método	Referências	Elemento meteorológicos de entrada ¹	Observações
Linacre (LN)	Pereira et al. (1997)	T _m , T _{po} , T _x , T _n	Trata-se de uma simplificação do método PEN. A parte (T _m -T _{po}) deste método pode ser estimada em função de Alt, T _m , T _x , T _n e, ainda, pela diferença entre as temperaturas médias dos meses mais quente e mais frio. Estima a ETo em escala mensal (mm mês ⁻¹). Ver, também, observação do método TW, para estimativa da ETo em escala diária.
Camargo (CAM)	Pereira et al. (1997)	T _m	É uma simplificação do método TW. Estima a ET _p em período de 10 ou 30 dias. Ver, também, observação do método TW, para estimativa da ETo em escala diária.
Jensen-Haise (JH)	Pereira et al. (1997), Trajkovic & Kolakovic (2009)	R _s , T	-
Ritchie (RT)	Jones and Ritchie (1990), Valipour (2015)	R, T, T _s , max, min	-
Hargreaves (HG)	Allen et al. (1998), Sousa et al. (2010)	T, T _x , T _n	Bastante divulgado como método "Hargreaves e Samani".
Priestley-Taylor (PT)	Pereira et al. (1997), Sentelhas et al. (2010), Tabari (2010)	T, P, R _n , G	É uma simplificação do método PEN. R _n e G podem seguir os mesmos procedimentos do método PM-FAO.
Penman Modificado (PENMOD)	Doorenbos & Pruitt (1977), Yoder et al. (2005), Chauhan & Shrivastava (2009)	-	Também conhecido por PENMAN FAO 24. É uma modificação do método PEN. As variáveis são praticamente as mesmas do método PEN.

(Conclusão)

FONTE: CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C.; Evapotranspiração de Referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Trop.**, Goiânia, v.41. 2011, p. 456-465.

3.2 As mudanças climáticas e a evapotranspiração

Nas últimas décadas, as mudanças climáticas têm causado impactos sobre os sistemas naturais e humanos em todos os continentes. Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC (2014), as alterações climáticas referem-se a uma mudança no estado do clima que pode ser identificada (por meio de testes estatísticos, por exemplo) por mudanças na média e / ou na variação das suas propriedades e que persistem durante um longo período de tempo.

Os efeitos de tais mudanças, segundo o IPCC (2001), são notados em algumas partes do mundo. O século passado teria sido o mais quente do milênio, presumidamente devido, em grande parte, à atividade econômica humana como, por exemplo, as usinas de energia, automóveis, responsável pela emissão de gases causadores do efeito estufa, em que se destaca o CO₂.

O IPCC destaca que a recente mudança no clima regional, particularmente o aumento da temperatura, já afetou muitos sistemas físicos e biológicos. (McCARTHY et al., 2001). Uma das maiores preocupações nos últimos anos diz respeito às mudanças climáticas e suas consequências para a população humana.

IRMAK et al. (2012) estudaram as tendências e magnitudes de mudanças em variáveis climáticas e também da ET_o para um período de 116 anos na bacia do rio Platte, Estados Unidos. Foram integrados procedimentos robustos e práticos para estimar as variáveis climáticas necessárias (radiação solar, velocidade do vento e déficit de pressão de vapor na saturação ($e_s - e_a$)), apenas possuindo valores observados de temperatura máxima (T_{max}) e temperatura mínima (T_{min}), para usar no método de Penman-Monteith, que fornece avaliações mais significativas dos efeitos integrados das mudanças dos parâmetros meteorológicos sobre a demanda evaporativa atmosférica. A variação das variáveis climatológicas, como as temperaturas máxima e mínima entre outras variáveis, pode impactar diretamente na evapotranspiração de referência (ET_o).

3.3 Métodos de preenchimento de falhas

Uma série de dados consistentes e principalmente confiáveis é o grande desafio para as pesquisas e estudos em climatologia. Uma série com esses atributos nem sempre é possível devido a vários fatores: ausência de dados em determinadas estações e locais, falhas nas séries históricas, mudanças nos locais onde os instrumentos de medição meteorológicos estão instalados ou até mesmo em muitos casos o fechamento das estações.

Nas últimas décadas, com a importância nos estudos relacionados com o aquecimento global, e suas implicações no clima, entre outros, as análises climáticas com ênfase nas temperaturas ganharam volume e destaque, mas a falta de dados históricos e a descontinuidade das séries temporais têm dificultado a execução das pesquisas e dos estudos sobre esse importante tema.

Nesta perspectiva, o presente trabalho utilizou técnicas de preenchimento de falhas de imputação multivariadas, para suprir os dados faltantes de temperatura máxima e mínima, insolação, umidade relativa e velocidade do vento a 2 metros de altura, nas séries históricas de dados meteorológicos do BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa) do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), para aplicações em meteorologia, hidrologia, recursos hídricos.

Como uma alternativa a Imputação Múltipla (IM) ou multivariada que surgiu na década de 80, proposta por Donald Rubin (RUBIN, 1987 e RUBIN, 1989), a imputação múltipla realiza os cálculos de dados ausentes “m” vezes, gerando “m” bancos de dados completos. Os “m” bancos são analisados separadamente por uma técnica de análise estatística e finalmente os “m” resultados obtidos são combinados para a análise final (ZHOU et al. 2001).

Diversos estudos têm utilizado técnicas multivariadas de imputação para preencher dados faltantes em diversas áreas de pesquisas, tais como saúde e clima e se observa que os métodos multivariados apresentam maior acurácia e precisão segundo NUMES (2007), JUNGER (2008), NUNES et al. (2010) e COSTA et al.(2012).

Foram avaliadas no trabalho as seguintes abordagens estatísticas para o preenchimento de falhas nas séries temporais:

- mtsdi (Multivariate Time Series Data Imputation): algoritmo para preenchimento de falhas em séries temporais normais multivariadas, baseado no algoritmo EM, proposto por JUNGER et al. (2003). Se destaca por sua estrutura de correlação entre as estações, levada em consideração a matriz de covariância dos dados. O método considera também a correlação temporal, por meio da modelagem independente das séries temporais em cada estação;

- mice (Multivariate Imputation by Chained Equations): algoritmo de imputação múltipla proposto por VAN BUUREN et al. (2006) em que o preenchimento dos dados faltantes é feito de forma iterativa considerando as densidades condicionais dos dados em cada estação;

- amelia II (HONAKER, 2010): é outro algoritmo de imputação múltipla de dados multivariados baseado em técnicas de bootstrapping.

A avaliação do desempenho destas abordagens no preenchimento de dados faltantes diários foi realizada mediante um estudo de simulação que consistiu na criação de um cenário e posterior medição de erro de imputação desses dados removidos que foram obtidos em cada um dos métodos utilizados. Foi gerado um cenário de imputação para cada uma das cinco variáveis em estudo (temperatura máxima e mínima, insolação, umidade relativa e velocidade do vento), removendo em cada uma delas um período de 90 dias aleatoriamente. A proporção total de dados faltantes no cenário, após a remoção dos dados observados, foi de 24,9 %, para todas as variáveis em estudo. As medidas de erros para comparar os resultados obtidos foram a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), o Erro Absoluto Médio (EAM) e o Índice de Concordância de Willmott (d). As análises foram executadas através da linguagem de programação R e seus pacotes “mtsdi”, “mice” e “amelia”.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

4.1.1 Área de estudo

O estado de Paraíba possui uma área de 56.468,427 km² e população de 3.999.415 habitantes. Localiza-se no leste da região Nordeste do Brasil, sendo banhado pelo Oceano Atlântico (GOVERNO DO ESTADO DE PARAÍBA, 2016). O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010) divide a área do estado em quatro mesorregiões geográficas representadas na Figura 3, a saber: Agreste Paraibano, Borborema, Mata Paraibana, Sertão Paraibano.

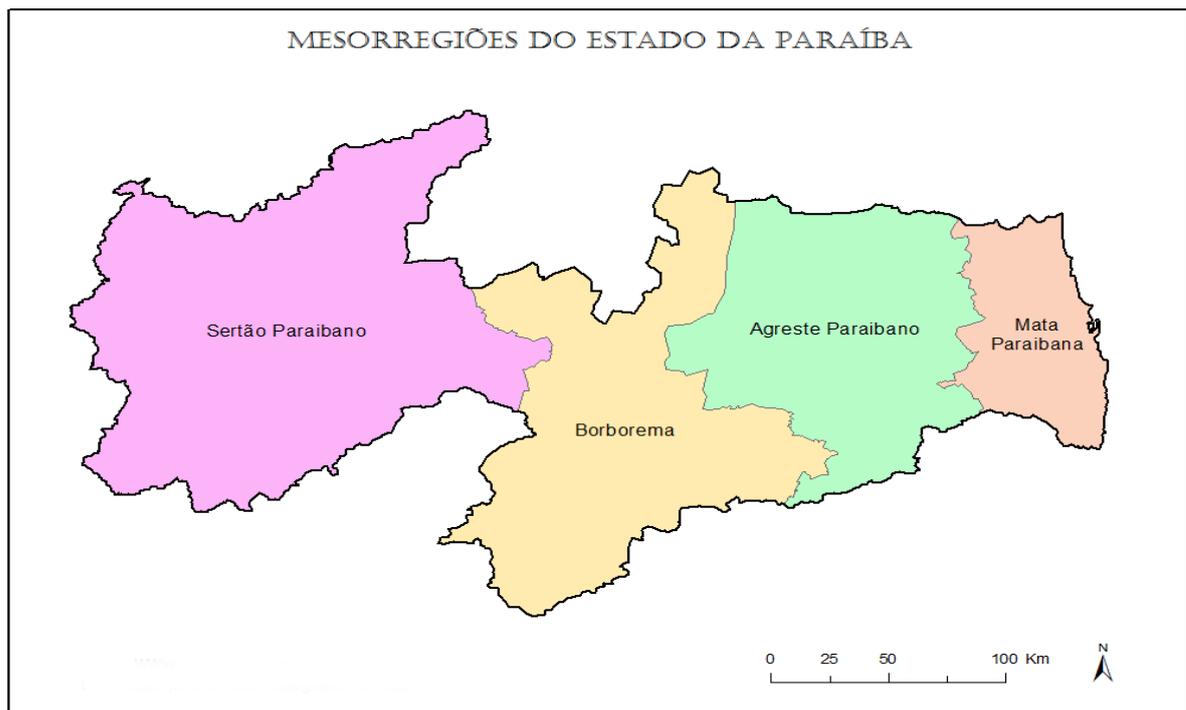


Figura 3 - Mesorregiões do Estado de Paraíba. Fonte: Adaptado do Atlas Nacional do Brasil (IBGE, 2010).

A altitude varia de maneira aproximadamente linear, crescendo a partir da planície litorânea para o interior, onde há pontos que chegam a ultrapassar os 1000 metros de altitude. A distribuição do clima da Paraíba está relacionada com a

localização geográfica. Sendo assim, quanto mais próximo do litoral, mais úmido se apresenta o clima, quanto mais longe, mais seco (ATLAS DA PARAÍBA, 2002).

A planície Atlântica engloba a encosta do planalto da Borborema, o terço leste do estado, com o clima, segundo a classificação de Köppen, do tipo (As'), clima tropical quente e úmido com chuvas de outono-inverno conforme mostrado na Figura 4. O Planalto da Borborema, a porção central do Estado, com clima do tipo Semiárido Quente (Bsh), com precipitação anual predominantemente abaixo de 600 mm, e temperatura mais baixa, devido ao efeito da altitude (400 m a 700 m). O Sertão, ocupa a parte oeste do Estado, formada pela depressão do rio Piranhas e seus contribuintes, com clima do tipo Semiárido Quente (Bsh), já as áreas mais baixas, com valores de altitudes (<300m) e (Aw') Tropical Quente e Úmido com chuvas de verão-outono. Nas áreas mais altas, por sua vez, se encontram as depressões e em todos os contrafortes e topo do Planalto de Princesa, ao sul, o estado faz divisa com o estado de Pernambuco, e a oeste, com o estado do Ceará.

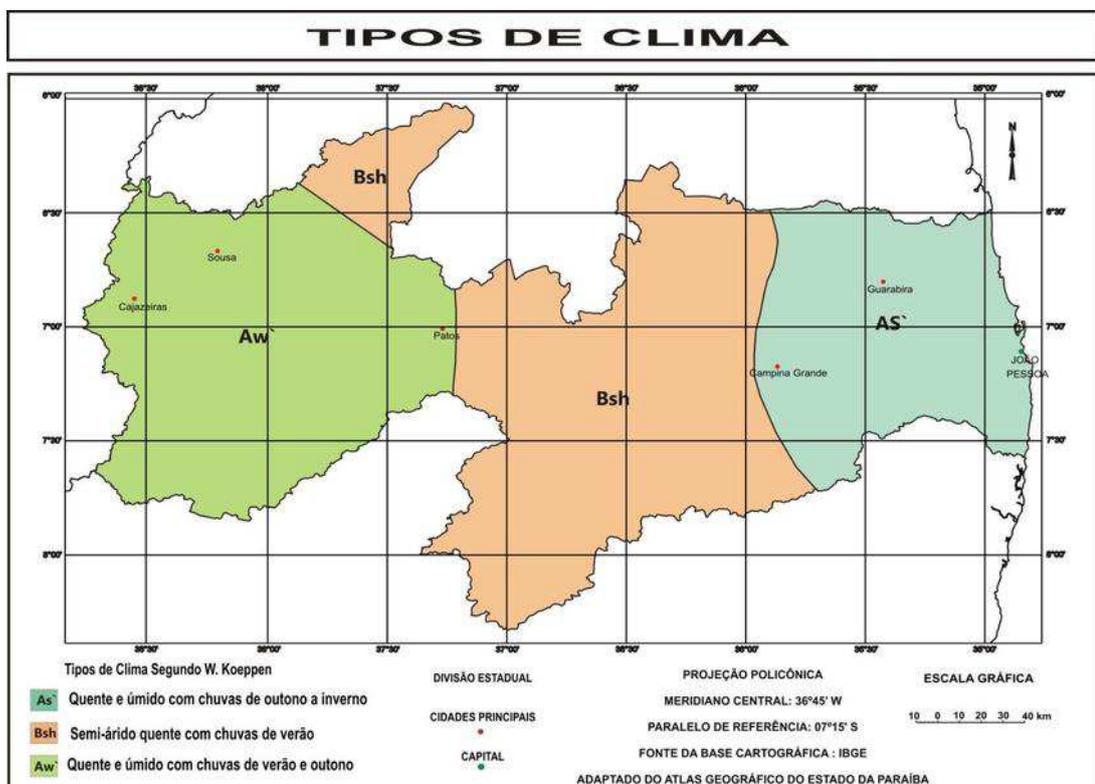


Figura 4 - Tipos de climas do estado da Paraíba, segundo a classificação de Köppen (Adaptado do atlas Geográfico da Paraíba, 2002)

4.1.2 Séries temporais de dados meteorológicos

Os dados meteorológicos das estações utilizadas na pesquisa, a saber, São Gonçalo, Patos, Monteiro, Campina Grande, Areia e João Pessoa, foram obtidos através do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), da rede observacional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2017), e contemplam o período que vai de janeiro de 1966 a dezembro de 2016. As variáveis coletadas para o estudo de tendências indicadoras de mudanças climáticas e aplicação no método PM-FAO pela FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) foram: velocidade do vento a 10 metros de altura em m/s (u_2), temperatura máxima – Tmax (°C), temperatura mínima - Tmin (°C), umidade relativa – UR (%) e insolação real diária - n_s (h), todas com valores diários.

Foram selecionadas todas as estações meteorológicas de observação de superfície convencional do estado da Paraíba, que têm disponibilidade de dados ao longo do período de estudo, apesar de algumas das séries obtidas apresentarem falhas pontuais ou consecutivas em alguns dos meses que fazem parte do intervalo de tempo estudado. As cidades em que elas se encontram instaladas são João Pessoa, na mesorregião do Litoral paraibano, Areia e Campina Grande, na mesorregião do Agreste, Patos e São Gonçalo, na mesorregião do Sertão, e Monteiro, na mesorregião da Borborema. As informações referentes à localização das estações (latitude, longitude e altitude) também foram encontradas no BDMEP e estão apresentadas no Tabela 1 e geograficamente representadas na Figura 5.

Estação	Latitude (Graus)	Longitude (Graus)	Altitude (Metros)
Areia	-6,966667 ^o	-35,683333 ^o	574,62
Campina Grande	-7,216667 ^o	-35,883333 ^o	547,56
João Pessoa	-7,1 ^o	-34,866667 ^o	7,43
Monteiro	-7,883333 ^o	-37,066667 ^o	603,66
Patos	-7,016667 ^o	-37,266667 ^o	249,09
São Gonçalo	-6,75 ^o	-38,216667 ^o	233,06

Tabela 1 – Dados de localização geográfica das estações meteorológicas. Fonte: INMET (2016)



Figura 5 - Localização geográfica das estações meteorológicas no Estado da Paraíba. Fonte: Google Earth (2016)

4.2 Métodos

4.3 Processamentos de Dados

Os dados coletados foram importados em software de criação e edição de planilhas, no qual foram efetuadas todas as operações de cálculo necessárias ao estudo e que serão apresentadas mais adiante. Inicialmente, analisaram-se os resultados mediante plotagem das diferentes séries em gráficos, seguindo recomendação de Allen (2008), o que permitiu a eliminação de falhas de medição como baixíssimas horas de Sol em meses nos quais as demais variáveis estavam com valores dentro dos limites usuais e não houve total de precipitação elevado ou muitos dias com precipitação. As séries resultantes dessa verificação inicial apresentaram dados bem distribuídos entre limites razoáveis e foram consideradas como válidas para utilização no desenvolvimento do estudo.

Os meses com dados válidos foram utilizados para a análise de tendência de mudança entre 1966 e 2016 (600 meses), exceto em Patos, onde os dados estão disponíveis somente a partir de 1975 e, portanto, as séries consideradas no estudo compreendem os anos de 1976 a 2016 (480 meses). Na Tabela 3, encontra-se a quantidade de dados mensais sem falhas verificados em cada uma das séries de

dados meteorológicos coletadas por localidade, tanto em valor absoluto como em percentual do período total dos meses de estudo.

Para a análise de tendências, transformaram-se os dados em valores médios anuais e sazonais, considerando cada trimestre equivalente a uma estação do ano – verão: janeiro, fevereiro e março; outono: abril, maio e junho; inverno: julho, agosto e setembro; e primavera: outubro, novembro e dezembro. Nas escalas anual e sazonal, respectivamente, os meses e anos das estações com falta de dados em um ou mais meses foram desconsiderados. A quantidade de dados válidos está representada no Tabela 4. Os valores médios obtidos para cada variável meteorológica com seus respectivos desvios padrão estão no Tabela 6, a partir do que se pode traçar um panorama dos dados apresentados e, conseqüentemente, a validação dos dados apresentados.

4.4 Método de Penman-Monteith-FAO

De acordo com Collischonn (2007), as equações da evapotranspiração (ET) são do tipo empírica ou de base física. A principal equação de base física é a equação de Penman-Monteith, encontrada em Allen et al. (1998), representada pela seguinte equação:

$$\lambda \cdot ET = \left[\frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_a}{r_s}\right)} \right] \quad (1)$$

Em que ET é a taxa de variação da água (mm dia^{-1}), λ é o calor latente de vaporização (MJ Kg^{-1}), Δ é a inclinação da curva de saturação do vapor da água ($\text{KPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), ρ_a é a massa específica do ar (Kg m^{-3}), c_p é o calor específico do ar a pressão constante ($\text{MJ Kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$), e_s é a pressão de saturação do vapor dada (KPa), e é a pressão real de vapor de água no ar (KPa), γ é a constante psicrométrica ($\text{KPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), r_s é a resistência superficial da vegetação (s m^{-1}) e r_a é a resistência aerodinâmica (s m^{-1}).

A aplicação do método de Penman-Monteith à superfície de referência, uma extensa superfície de grama verde de altura uniforme, crescendo ativamente e

adequadamente irrigada, resultou na equação recomendada pela FAO para o cálculo da ET_o , superando as limitações de métodos anteriores e fornecendo valores mais consistentes com dados de uso de água por plantações investigadas em várias partes do mundo (ALLEN et al., 1998). O método PM-FAO requer dados de T_{max} , T_{min} , n , $UR_{máx}$, $UR_{mín}$, U_2 e R_{solar} , sendo que a expressão destinada ao cômputo da ET_o é dada por:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{avg} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)} \quad (2)$$

onde:

ET_o	evapotranspiração de referência [mm dia^{-1}],
R_n	saldo de radiação à superfície [$\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$],
G	fluxo de calor no solo [$\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$],
T_{avg}	média entre extremos de temperatura do ar a 2 metros de altura [$^{\circ}\text{C}$],
u_2	velocidade média do vento a 2 metros de altura [m s^{-1}],
e_s	pressão de saturação do vapor [kPa],
e_a	pressão parcial de vapor [kPa],
$(e_s - e_a)$	déficit de pressão de vapor [kPa],
Δ	declividade da curva de pressão de vapor [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$],
γ	constante psicrométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$].

O procedimento de cálculo de todas as variáveis envolvidas no cômputo da ET_o de acordo com o Boletim da FAO-56 (ALLEN et al., 1998), é apresentado a seguir.

Observa-se que a expressão $\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)$ da Equação (2) deriva da expressão $\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_a}{r_s}\right)$ da Equação (1). De acordo com a FAO-56, r_s é a resistência superficial da vegetação, que é dada por:

$$r_s = \frac{r_l}{IAF_{ativo}} \quad (3)$$

onde r_l é a resistência estomática na folha bem iluminada que possui um valor médio em relação a uma única folha de 100 ($s\ m^{-1}$) sob circunstância ideal de campo: IAF_{ativo} representa o índice de área foliar ativo, ou seja, índice de área da folha que contribui ativamente a transferência de vapor para a superfície (adimensional), que pode ser calculado através de (ALLEN et al., 1989):

$$IAF_{ativo} = 0,5 \cdot IAF \quad (4)$$

em que IAF é o índice de área foliar de uma cultura específica, onde:

$$IAF = 24 \cdot h \quad (5)$$

em que h é a altura média da cultura, no caso da grama 0,12 m. Sendo assim, r_s dada na Equação (3) se apresenta como:

$$r_s = \frac{100}{0,5 \cdot (24) \cdot (0,12)} \cong 70\ s\ m^{-1} \quad (6)$$

A resistência aerodinâmica (r_a), por sua vez, é dada por:

$$r_a = \frac{208}{U_2} \quad (7)$$

onde U_2 representa a velocidade do vento ($m\ s^{-1}$) a 2 m de altura.

Logo, tem-se que:

$$\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_a}{r_s}\right) \Rightarrow \Delta + \gamma \cdot \left[1 + \frac{70}{\left(\frac{208}{U_2}\right)}\right] \Rightarrow \Delta + \gamma(1 + 0,34\ u_2) \quad (8)$$

em que a Equação (7) é dada em $KPa^{\circ}C^{-1}$.

Já a expressão $\Delta(R_n - G)$ da Equação (1) se apresenta com o fator 0,408 na Equação (2). De acordo com a FAO-56, R_n e G representam energia disponível por unidade de área expressadas em ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$). Para convertê-la é usado um fator de conversão, como Δ é dado em ($KPa^{\circ}C^{-1}$), logo:

$$0,408. \Delta. (R_n - G) \text{ (mmdia}^{-1}\text{KPa}^{\circ}\text{C}^{-1}\text{)} \quad (9)$$

A expressão $\gamma \frac{900}{T_{avg}+273} u_2$ da Equação (2) deriva da expressão $\frac{C_p \cdot \rho_a}{r_a}$ da Equação (1) e como:

$$C_p = \frac{\gamma \cdot \varepsilon \cdot \lambda}{P} \quad (10)$$

onde C_p é o calor específico do ar a pressão constante ($\text{MJ Kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), ε é a razão entre a massa molecular do vapor d'água e a massa molecular do ar seco de valor igual a 0,622, λ é o calor latente de vaporização de valo igual a 2,24 (MJ Kg^{-1}), γ é o coeficiente psicrométrico ($\text{KPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$) e P é a pressão atmosférica (KPa).

A Equação (11) determina massa específica do ar (ρ_a) (Kg M^{-3}), segundo a FAO-56, logo:

$$\rho_a = \frac{P}{T_v \cdot R} \quad (11)$$

em que R é a constante do gás ideal com valor igual a 0,287 ($\text{kJ kg}^{-1}\text{k}^{-1}$) T_v á a temperatura virtual em (k).

A temperatura virtual é representada por:

$$T_v = 1,01 \cdot (T + 273) \quad (12)$$

onde T é temperatura do ar em $^{\circ}\text{C}$.

Logo, substituindo a Equação (11) na Equação (10) e isolando P na mesma, como também, na Equação (9), pode-se igualá-las:

$$C_p \cdot \rho_a = \frac{\gamma \cdot \varepsilon \cdot \lambda}{1,01 \cdot (T+273) \cdot R} \quad (13)$$

Aplicando as Equações (10) e (7) na expressão $\frac{C_p \cdot \rho_a}{r_a}$, obtém-se:

$$\frac{C_p \cdot \rho_a}{r_a} = \frac{\gamma \cdot \varepsilon \cdot \lambda \cdot U_2}{1,01 \cdot (T+273) \cdot R \cdot 208} = \frac{\gamma \cdot 0,622 \cdot 2,45 \cdot U_2}{1,01 \cdot (T+273) \cdot 0,287 \cdot 208} = \frac{\gamma \cdot 1,524 \cdot U_2}{60,3 \cdot (T+273)} \quad [\text{em MJ m}^{-2}\text{C}^{-1}\text{s}^{-1}] \quad (I)$$

Para converter a expressão ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}\text{C}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$), aplica-se o fator de conversão 86400, então:

$$\frac{C_p \cdot \rho_a}{r_a} = \frac{\gamma \cdot 1,524 \cdot U_2}{60,3 \cdot (T+273)} \cdot 86400 = \frac{\gamma \cdot 2183,6 \cdot U_2}{(T+273)} \quad [\text{em MJ} \cdot \text{m}^{-2}\text{C}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}] \quad (II)$$

Usando o fator de conversão 0,408, transformando $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}\text{C}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$, para $\text{mm} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$, se chega a seguinte expressão:

$$\frac{C_p \cdot \rho_a}{r_a} = \frac{\gamma \cdot 2183,6 \cdot U_2}{(T+273)} \cdot 0,408 \leftrightarrow \frac{C_p \cdot \rho_a}{r_a} = \frac{\gamma \cdot 900 \cdot U_2}{(T+273)} \quad [\text{mm} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}] \quad (III)$$

Analisando a Equação (2), resta a expressão ($e_s - e$), que representa o déficit de pressão de vapor do ar para a altura de referência, em (KPa). Então fazendo uma analogia da Equação (2) com as expressões (I), (II), (III) e suas respectivas unidades, tem-se a unidade final da ET_o -PM:

$$ET_o(PM) = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T_{avg} + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (14)$$

Logo, a conversão das unidades fica:

$$ET_o(PM) = \frac{(II) + (III) \cdot (IV)}{(I)} = \left[\frac{\left(\frac{\text{mm} \cdot \text{KPa}}{\text{dia} \cdot \text{C}} \right) + \left(\frac{\text{mm} \cdot \text{KPa}}{\text{dia} \cdot \text{C} \cdot 1} \right)}{\left(\frac{\text{KPa}}{\text{C}} \right)} \right] \leftrightarrow ET_o(PM) = [\text{mm dia}^{-1}] \quad (15)$$

4.5 Teste de Mann-Kendall

A análise da tendência das séries temporais foi realizada através do teste de Mann-Kendall (KENDALL, 1975). Este teste não paramétrico é recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para avaliar a tendência de série temporal de dados ambientais (YUE et., 2002).

O teste de Mann-Kendall é classificado como não paramétrico. Isso significa que ele não requer que os dados de uma dada série temporal sigam uma distribuição normal, mas apenas que sejam independentes. É amplamente usado para verificar a significância estatística de tendências em séries temporais climatológicas e leva esse nome porque Mann (1945) usou-o originalmente e Kendall (1975) derivou a sua distribuição estatística posteriormente.

O teste é aplicável a casos em que os valores amostrais $\{x_i, i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ de uma série temporal de dados obedecem ao seguinte modelo: $x_i = f(t_i) + \varepsilon_i$, onde $f(t)$ é uma função contínua monótona crescente ou decrescente; os residuais ε_i são de uma mesma distribuição com média zero e a variância da distribuição é constante no tempo. A hipótese nula H_0 é que x_i é independente e identicamente distribuída, enquanto a hipótese alternativa H_a é de que existe de fato uma tendência monótona na variável X .

Sendo n o número de dados da série temporal disponíveis no período analisado, x_i e x_j os valores sequenciais dos dados nos momentos i e j , respectivamente, e $Snl(x_j - x_i)$ a função de sinal definida pela Equação (16), enquanto a estatística S estatístico é calculada com base na Equação (17).

$$Snl = \begin{cases} +1, se (x_j - x_i) > 0 \\ 0, se (x_j - x_i) = 0 \\ -1, se (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n Snl(x_j - x_i) \quad (17)$$

Quando $n \geq 10$, o S estatístico é normalmente distribuído, com média zero e variância $Var(S)$ dada pela Eq. (18), onde m é o número de grupos contendo valores iguais e t_i o número de pontos no grupo i . Então, um teste estatístico padronizado Z_S pode ser computado usando a Equação (19).

$$Var = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (18)$$

$$Z_S = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (19)$$

Valores positivos de Z_S indicam tendências crescentes, enquanto valores negativos indicam tendências decrescentes. As tendências são testadas em um nível de significância específico α e quando $|Z_S| > Z_{1-\alpha/2}$, a hipótese nula H_0 é rejeitada e uma tendência significativa existe na série temporal. $Z_{1-\alpha/2}$ é obtido pela tabela de distribuição normal padrão.

O nível de significância α usado neste trabalho foi 0,05, de maneira a tentar evitar tanto os Erros do Tipo I – rejeitar H_0 quando ela seja verdadeira –, como o Erro do Tipo II – não rejeitar H_0 quando ela seja falsa. A hipótese nula de não existência de tendência é rejeitada se $|Z_S|$ estiver fora do intervalo $-1,96 < |Z_S| < 1,96$ no nível de significância de 0,05.

Os cálculos e resultados do teste de SMK foram realizados a partir do comando “SeasonalMannKendall()” do pacote Kendall do programa estático R (R Core Team 2017).

4.6 Estimador de Inclinação Sen

O teste de Mann-Kendall permite detectar tendências estatisticamente significativas, porém não possibilita estimativas da inclinação da tendência (magnitude) em uma série temporal. Por esta razão, utilizou-se de forma complementar um estimador estatístico não paramétrico chamado de Theil-Sen ou método de Sen.

O estimador de tendência de Theil-Sen, Equação (20), inicialmente proposto por Theil (1950) e posteriormente expandido por Sen (1968), é usado para estimar a inclinação real de uma tendência existente, que representa a taxa anual de variação do parâmetro em estudo. Esse estimador se aplica a casos em que as tendências podem ser consideradas da forma $f(t_i) = Qx_i + B$, ou seja, lineares com coeficiente

angular Q e coeficiente linear B . Calculam-se as inclinações para cada par de valores usando a seguinte equação:

$$S_e = \text{mediana} \left[\frac{x_j - x_i}{j - i} \right] \quad (20)$$

onde x_i e x_j são os valores dos dados nos momentos i e j respectivamente, para todo $j > i$. Dessa forma, e sendo n o número de dados da série disponíveis no período, obtém-se até $N = n(n - 1)/2$ inclinações Q_k . A mediana dos N valores Q_k assim obtidos é então a inclinação Q procurada, considerar-se-á inclinação Q de Sen.

Para obter uma estimativa do coeficiente linear B , os n valores de diferenças $x_i - Qt_i$ são calculados B é a mediana de tais diferenças (SIROIS, 1998). Este método seleciona, entre todas as linhas de inclinação formadas por cada par de pontos da amostra, aquela correspondente à inclinação mediana.

O teste de Theil-Sen identifica possíveis mudanças de tendência e magnitude na série, sendo uma técnica muito utilizada para a verificação da magnitude segundo DEO et al. (2007) e YUE e HASHINO (2003). Foi utilizado um nível de significância $\alpha = 0,05$ no programa estático R (R Core Team 2017). O comando utilizado para o estimador de Sen da Equação (20) foi o `zyp.sen()` do pacote `zyp`.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Teste de homogeneidade

A homogeneidade dos dados é muito importante para detectar a variabilidade em uma série temporal. No geral, quando os dados são homogêneos significa que as medições dos dados são tomadas no mesmo tempo e com os mesmos instrumentos e no mesmo ambiente, segundo LONGOBORDI e VILLANI (2010) e MARTINEZ et al. (2011). Tendo em vista os aspectos citados

acima, foi traçado um panorama dos dados meteorológicos das séries temporais, que engloba as localidades em estudo, referenciadas nesse trabalho, destacando a quantidade e a porcentagem dos dados faltantes meteorológicos de todas as localidades das utilizadas no cálculo da ETo. Ao observar a Tabela 2, pode-se perceber a variabilidade dos dados, quanto á sua regularidade de registro.

Localidades	Dados faltantes e porcentagem (%) das Variáveis meteorológicas									
	Tx (°C)		Tm (°C)		n (horas)		UR (%)		Vv (m s ⁻¹)	
João Pessoa	2762	14.8%	3392	18.2%	3393	18.2%	2443	13.1%	4062	21.8%
Areia	882	10%	900	10.2%	1053	12%	1095	12.4%	1170	13.3%
Campina Grande	4597	24.6%	4597	24.6%	5127	27.5%	5446	29.4%	5658	30.3%
Monteiro	8668	46.5%	8076	43.3%	9408	50.2%	8626	46.3%	9347	50.1%
Patos	4001	26%	4473	29.1%	4170	27.1%	4526	29.5%	4495	29.3%
São Gonçalo	2920	15.6 %	2920	15.6 %	4679	25.1%	6463	34.7%	6337	34%

Tabela 2 - Quantidade de dados faltantes e porcentagem por localidade.

Também foi traçado um panorama dos dados válidos na escala mensal e anual, que se pode observar nas Tabelas 3 e 4.

Número de meses com dados válidos (% do total)					
Localidade	Tmax	Tmin	n	RH _{médio}	Vv
Areia	262 (43.6%)	262 (43.6%)	257 (42%)	255 (42.5%)	253 (42.1%)
Campina Grande	462 (77%)	462 (77%)	444 (74%)	438 (73%)	426 (71%)
João Pessoa	528 (88%)	507 (84.5%)	507 (84.5%)	539 (89.8%)	485 (80.8%)
Monteiro	331 (55%)	351 (58.5%)	307 (51%)	333 (55.5%)	333 (55.5%)
Patos	369 (61.5%)	345 (57.5%)	341(56.83%)	280 (46.6%)	324 (54%)
São Gonçalo	454 (75.6%)	454 (75.6%)	442 (73.6%)	392 (65.3%)	397 (66%)

Tabela 3 - Quantidade de dados mensais válidos para cada variável meteorológica, Tmax, Tmin, n, U₂ e UR por localidade.

Número de dados válidos (% do total)						
Localidade	Escala	Tmax	Tmin	n	RH _{médio}	Vv
João Pessoa	Anual	44 (88%)	42(84%)	42(84%)	44(88%)	40(80%)
Monteiro	Anual	27(54%)	29(58%)	25(50%)	27(54%)	27(54%)
Areia	Anual	21(42%)	21(42%)	21(42%)	21(42%)	21(42%)
Campina Grande	Anual	38(76%)	38(76%)	37(74%)	36(72%)	35(70%)
Patos	Anual	30(60%)	28(56%)	28(56%)	23(46%)	27(54%)
São Gonçalo	Anual	37(74%)	37(74%)	36(72%)	32(64%)	33(66%)

Tabela 4 – Quantidade de dados válidos para cada variável meteorológica, Tmax, Tmin, n, U₂ e UR por localidade e escala temporal

Para analisar a homogeneidade das variáveis meteorológicas, nas séries anuais a saber, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, insolação, velocidade do vento a 2 metros de altura e evapotranspiração de referência, foi aplicado o teste de sequência conhecido como “run test”, recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) em sua nota técnica nº 81 (THOM, 1966). O Run é um teste não paramétrico apresentado por Thom (1966) e sua utilização possibilita avaliar se os dados de uma série ocorre de forma aleatória. Logo, ele consiste em realizar a contagem dos números de oscilações acima e abaixo da mediana em uma série ordenada. Esse número de oscilações é denominado de Run, e a hipótese a ser testada é se o valor observado está dentro da faixa considerada aceitável. Estes valores calculados podem ser comparados aos valores teóricos da distribuição normal, considerando o nível de significância de 5%, o valor de R deve estar entre -1,96 e 1,96. Logo, se o R calculado for maior que estes limites tabelados, rejeita-se a hipótese nula. Valores de Run altos indicam muitas oscilações e valores baixos indicam um desvio em relação à mediana durante o período de registro

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

$$E(u) = \frac{2 N_1 N_2}{N_1 N_2} + 1 \quad (21)$$

e a variância da distribuição pode ser estimada por:

$$Var(u) = \frac{2 N_1 N_2 (2N_1 N_2 - N_1 N_2)}{(N_1 + N_2)^2 \cdot (N_1 + N_2 - 1)} + 1 \quad (22)$$

Onde u representa o número de Runs. Por isso, a Hipótese Nula de que a distribuição dos símbolos ocorre normalmente, e de que a amostra é aleatória, pode ser testada com base na estatística:

$$R = \frac{u - E(u)}{\sqrt{var(u)}} \quad (23)$$

O teste foi executado no programa estatístico R, por meio da função “runs.test()” do pacote “lawstat”.

A Tabela 5 dispõe dos valores do parâmetro R do teste de homogeneidade “runs.test” para os municípios de João Pessoa, Monteiro, Areia, Campina Grande, Patos e São Gonçalo.

Pode-se observar que os valores da estatística R para as variáveis meteorológicas analisadas, a saber, temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin), insolação (n), unidade relativa (UR), velocidade do vento (U_2) a 2 metros de altura e evapotranspiração de referência (ET_o), variara com uma mínima de 0,19 para a variável de Tmin e UR no município de Monteiro a uma máxima de 2,41 para variável de ET_o no município de Areia, ficando acima do valor máximo estipulado pelo teste que é |1,96|. Logo, pode-se destacar que as variáveis das séries meteorológicas utilizadas na pesquisa que podem ser consideradas homogêneas (H), são: Tmax, Tmin, n e ET_o para o município de João Pessoa; Tmax, Tmin, U_2 e ET_o em Monteiro; Tmax, Tmin, n, UR e ET_o para o município de Campina Grande; e Tmax, n e U_2 para o município de Patos. Possibilita análises mais profundas que envolvam análises de tendência de séries temporais nos referidos municípios do estado da Paraíba.

Tabela 5 - Resultado do teste de homogeneidade (run test) para as séries anuais dos parâmetros meteorológicos e ET_o para os municípios de João Pessoa, Monteiro, Areia, Campina Grande, Patos e São Gonçalo (1966 – 2016), excerto patos que vai de 1975 – 2016.

Variável	João Pessoa		Monteiro		Areia		Campina Grande		Patos		São Gonçalo	
	R	Res.	R	Res.	R	Res.	R	Res.	R	Res.	R	Res.
Temperatura máxima(Tmax)	0,27	H	0,29	H	2,40	NH	0,22	H	0,23	H	2,20	NH
Temperatura mínima(Tmin)	0,38	H	0,19	H	2,26	NH	0,21	H	2,34	NH	2,48	NH
Insolação (n)	0,60	H	1,99	NH	2,29	NH	0,52	H	0,46	H	3,51	NH
Umidade relativa (UR)	2,45	NH	1,98	NH	2,60	NH	0,33	H	2,28	NH	2,31	NH
Velocidade do vento (U_2)	2,05	NH	0,29	H	2,43	NH	2,38	NH	0,34	H	2,39	NH
Evapotranspiração de referência (ET_o)	0,29	H	0,20	H	2,41	NH	0,28	H	2,31	NH	2,35	NH

H = Homogeneidade; NH = Não homogeneidade.

Para complementar o teste de homogeneidade (run test), foram calculados os valores médios e o desvio padrão na escala sazonal e anual de todas as variáveis meteorológicas utilizadas no cálculo da ET_o , que se observa na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores médio e desvio padrão de cada variável meteorológica, Tmax, Tmin, ns, U_2 e UR por localidade e escala temporal

(Continua)						
Localidade	Escala	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	n_s (h)	$RH_{méd}$ (%)	U_2 (m s ⁻¹)
João Pessoa	Anual	29,6 ± 1,2	23,3 ± 1,7	7,6 ± 2,8	76,4 ± 6,2	2,8 ± 0,9
	Verão	30,5 ± 0,9	24,2 ± 1,4	7,7 ± 2,7	74,8 ± 5,2	2,7 ± 5,2
	Outono	29,6 ± 1,2	22,9 ± 1,2	6,6 ± 3,0	79,5 ± 6,4	2,6 ± 0,9
	Inverno	28,5 ± 1,0	22,0 ± 1,4	7,1 ± 2,7	78,4 ± 6,4	3,0 ± 0,9
	Primavera	29,9 ± 0,8	24,1 ± 1,5	8,9 ± 2,1	72,9 ± 4,1	3,0 ± 0,9
Monteiro	Anual	30,8 ± 1,8	18,5 ± 1,8	7,7 ± 2,0	67,3 ± 9,3	3,1 ± 1,0
	Verão	31,3 ± 1,4	19,1 ± 1,5	7,7 ± 1,8	66,9 ± 9,0	3,0 ± 1,0
	Outono	29,9 ± 1,7	18,0 ± 1,0	7,1 ± 2,0	72,1 ± 9,3	2,7 ± 1,0
	Inverno	30,0 ± 1,7	17,8 ± 2,0	7,5 ± 2,0	68,2 ± 8,3	3,1 ± 0,9
	Primavera	31,9 ± 1,4	19,2 ± 1,3	8,3 ± 1,9	61,9 ± 7,5	3,6 ± 1,0

Tabela 6 – Valores médio e desvio padrão de cada variável meteorológica, T_{max}, T_{min}, n_s, U₂ e UR por localidade e escala temporal

(Continuação)						
Localidade	Escala	T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	n _s (h)	RH _{médio} (%)	U ₂ (m s ⁻¹)
Areia	Anual	27,3 ± 2,2	19,7 ± 1,3	5,9 ± 2,8	83,2 ± 6,7	3,1 ± 1,2
	Verão	28,7 ± 1,7	20,6 ± 1,0	6,1 ± 2,6	73,5 ± 22,8	2,8 ± 1,1
	Outono	26,6 ± 2,0	19,8 ± 1,0	5,4 ± 1,8	86,8 ± 5,9	2,9 ± 1,2
	Inverno	25,4 ± 1,8	18,5 ± 1,0	4,2 ± 3,0	85,1 ± 6,5	3,5 ± 1,4
	Primavera	28,7 ± 1,4	20,9 ± 1,1	7,0 ± 2,1	78,6 ± 5,2	3,4 ± 1,2
Campina Grande	Anual	28,4 ± 2,2	19,7 ± 1,3	7,0 ± 2,6	78,1 ± 7,3	3,6 ± 1,0
	Verão	29,7 ± 1,8	20,6 ± 1,0	7,1 ± 2,7	77,1 ± 6,8	3,5 ± 1,1
	Outono	27,7 ± 2,0	20,0 ± 1,1	6,1 ± 2,7	81,3 ± 7,1	3,2 ± 1,0
	Inverno	26,8 ± 1,9	18,6 ± 1,2	5,8 ± 2,7	79,8 ± 7,5	3,6 ± 1,0
	Primavera	29,5 ± 1,5	21,0 ± 1,0	8,1 ± 2,0	74,1 ± 5,7	4,2 ± 0,9
Patos	Anual	33,9 ± 1,9	22,1 ± 1,3	8,6 ± 2,2	57,2 ± 10,6	3,9 ± 1,1
	Verão	34,0 ± 1,9	22,6 ± 1,2	8,2 ± 2,5	60,5 ± 11,6	3,4 ± 1,2
	Outono	32,9 ± 1,7	22,0 ± 1,2	8,1 ± 2,2	63,1 ± 10,6	3,3 ± 1,1
	Inverno	33,4 ± 1,5	21,3 ± 1,2	8,7 ± 2,1	54,6 ± 7,2	4,3 ± 0,9
	Primavera	35,3 ± 1,4	22,4 ± 1,2	9,3 ± 1,9	50,9 ± 7,1	4,5 ± 1,0
São Gonçalo	Anual	32,9 ± 1,0	21,2 ± 0,6	8,9 ± 0,3	62,5 ± 4,4	2,3 ± 0,4
	Verão	32,4 ± 1,9	21,8 ± 1,2	8,4 ± 2,5	67,9 ± 10,7	2,0 ± 0,8
	Outono	31,6 ± 1,4	20,8 ± 1,7	8,0 ± 2,1	68,3 ± 10,5	2,0 ± 0,7
	Inverno	32,8 ± 1,8	20,1 ± 2,0	7,4 ± 1,8	56,9 ± 9,9	2,4 ± 0,8
	Primavera	34,2 ± 2,0	21,9 ± 1,4	9,6 ± 2,0	57,0 ± 9,0	2,6 ± 0,9

(Conclusão)

5.2 Preenchimento de falhas nas séries temporais

O presente trabalho se utilizou das técnicas de preenchimento de falhas de imputação multivariada, mtsdi (Multivariate Time Series Data Imputation), mice (Multivariate imputation by Chained Equations) e amelia II. O desempenho das três abordagens de imputação, quando aplicadas às variáveis em estudo, é mostrado nas Figuras 6 e 7. Destaca-se o bom desempenho da técnica estatística “mtsdi”, com Erros Absolutos Médios (EAM) que variam sempre abaixo de 1,2 em todas as

variáveis em estudo e o Índices de Concordância de Willmott (d) próximos de 1,0, indicando uma concordância muito boa entre os dados observados (removidos) e preenchidos. Já o método de “mice” e “amelia” apresentaram os piores resultados, com erros substancialmente maiores aos da outra metodologia.

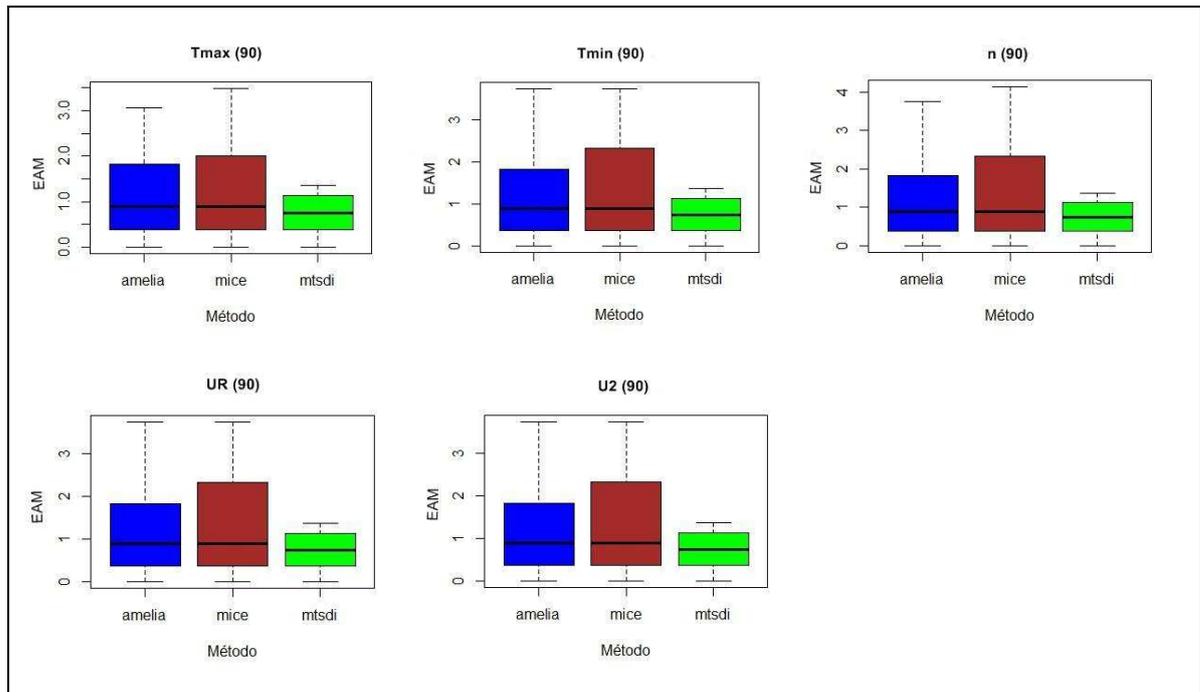


Figura 6 - Erro Absoluto Médio (EAM) para as três abordagens de imputação, aplicadas a variáveis diárias de temperatura máxima e mínima, insolação, humidade relativa e velocidade do vento no cenário (período com 90 dias removidos).

O Índice de Concordância de Willmott apresentou valores bem próximos de 1,0, o que mostra boa concordância entre os dados simulados e os dados reais.

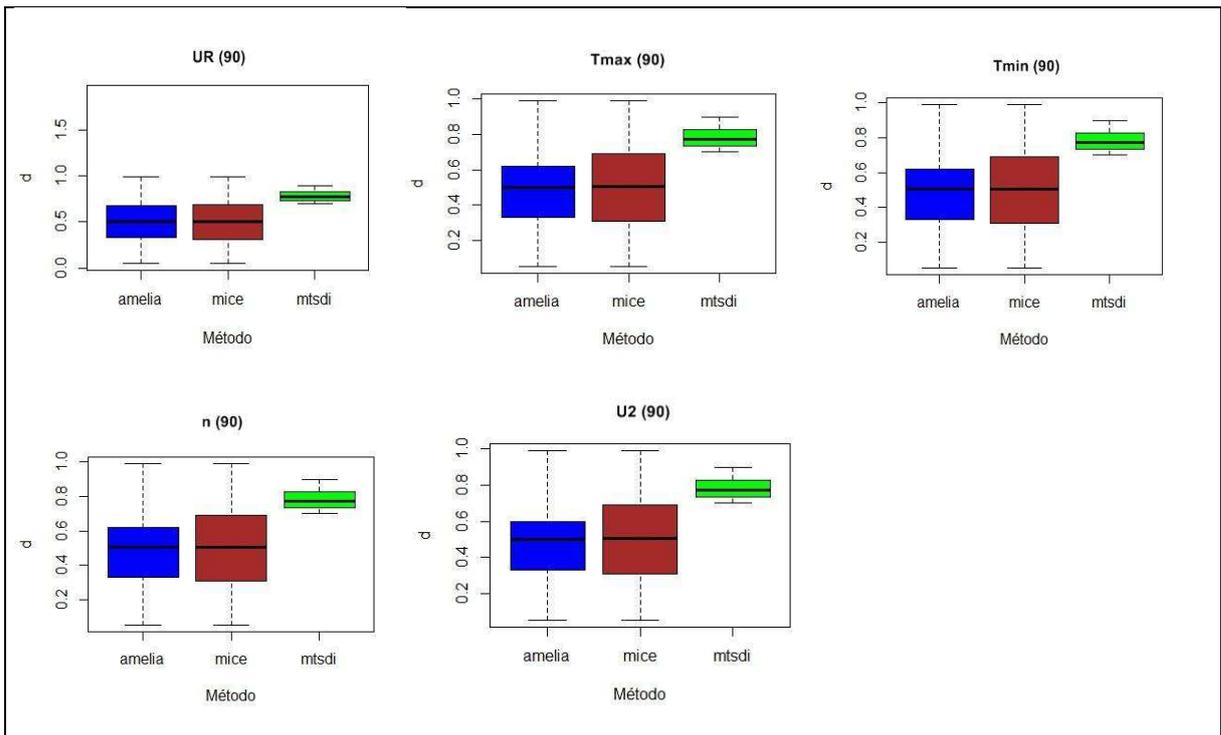


Figura 7 - Índice de concordância de Willmott (d) para as três abordagens de imputação, aplicadas a variáveis diárias de temperatura máxima e mínima, insolação, humidade relativa e velocidade do vento no cenário (período com 90 dias removidos)

Os dados faltantes que se deseja completar são caracterizados por “NA”, e foi utilizado o número de imputações múltiplas, padrão do pacote MTSDI (Multivariate Time Series data Imputation) versão 3.4.2 do software estatístico R (R Core Team, 2017). A série da variável meteorológica original com falhas é colocada lado a lado das estações mais próximas da localidade em uma matriz como exemplo na Tabela 7.

Tabela 7 - Ilustração de dados a serem imputados, representados por NA, referentes a temperatura máxima, temperatura mínima, insolação, umidade relativa e velocidade do vento a 2 metros de altura para a estação de São Gonçalo (a) e os dados imputados (b). Os dados com falhas (São Gonçalo) estão ao lado da estação próxima com dados completos (Patos).

(a) Tmax, Tmin, n, UR, U₂

Ano	Mês	Dia	Tz (SG)	Tz (Patos)	Tm(SG)	Tm(Patos)	n(SG)	n(Patos)	Ur(SG)	Ur(Patos)	Vv(SG)	Vv(Patos)
1975	1	1	34.3	34.8	23.2	24.1	10.0	4.3	55.5	42.5	2.6	5.1
1975	1	2	34.0	35.6	22.6	22.9	7.9	7.1	53.3	44.5	2.9	5.2
1975	1	3	35.1	35.6	23.8	22.0	8.4	8.2	48.0	46.3	3.0	5.6
1975	1	4	35.7	36.2	21.4	25.4	11.5	8.9	42.8	47.8	4.1	4.6
1975	1	5	35.4	35.8	19.4	25.1	11.5	7.9	47.0	45.8	1.4	5.0
1975	1	6	35.8	36.8	22.5	24.1	11.0	9.5	50.5	47.0	3.5	4.1
1975	1	7	NA	34.2	NA	25.6	NA	4.7	NA	51.3	NA	4.1
1975	1	8	NA	33.6	NA	23.5	NA	2.4	NA	61.8	NA	3.3
1975	1	9	NA	33.7	NA	23.3	NA	3.5	NA	65.8	NA	1.8
1975	1	10	NA	34.0	NA	22.7	NA	5.5	NA	47.3	NA	3.2
1975	1	11	NA	35.5	NA	22.9	NA	10.3	NA	35.8	NA	4.0
1975	1	12	NA	36.4	NA	21.8	NA	11.5	NA	32.5	NA	2.3
1975	1	13	NA	35.5	NA	23.9	NA	7.7	NA	66.8	NA	2.9
1975	1	14	NA	32.1	NA	22.0	NA	6.2	NA	57.3	NA	5.0
1975	1	15	NA	34.6	NA	22.5	NA	7.7	NA	53.0	NA	3.8
1975	1	16	NA	36.2	NA	22.8	NA	10.1	NA	40.5	NA	5.2
1975	1	17	NA	35.6	NA	23.0	NA	10.3	NA	49.5	NA	5.6
1975	1	18	NA	36.3	NA	24.0	NA	10.6	NA	48.3	NA	3.5
1975	1	19	33.3	35.5	21.8	24.1	3.8	9.0	61.3	45.8	2.6	3.2
1975	1	20	32.3	36.2	22.8	23.1	1.9	8.2	58.3	38.3	2.7	2.8
1975	1	21	27.8	37.6	21.4	22.0	0.9	10.8	81.3	38.0	1.8	2.7
1975	1	22	31.6	36.0	20.5	21.9	3.8	8.9	74.0	54.8	1.8	1.2
1975	1	23	26.0	36.0	21.1	23.0	0.1	8.3	85.3	59.8	1.5	3.5
1975	1	24	32.2	36.6	21.6	22.6	5.8	10.5	61.5	40.0	2.1	3.9
1975	1	25	33.7	36.9	21.4	22.4	11.6	11.4	58.8	36.8	3.8	4.4
1975	1	26	32.8	36.7	21.0	22.3	11.7	10.1	62.0	43.8	2.6	5.5
1975	1	27	33.3	36.1	23.0	23.7	10.9	6.8	61.3	51.3	3.2	5.1
1975	1	28	32.0	36.6	24.0	24.5	8.1	9.2	67.0	50.0	1.9	5.6
1975	1	29	31.4	36.6	20.7	25.1	6.2	7.6	72.0	52.8	1.6	7.4
1975	1	30	32.2	36.8	19.0	24.9	9.1	7.1	64.5	43.0	4.5	6.6
1975	1	31	32.1	36.5	21.4	23.8	10.5	9.8	64.0	38.5	2.9	4.7

(b) Tmax, Tmin, n, UR, U₂

Ano	Mês	Dia	Tz (SG)	Tz (Patos)	Tm(SG)	Tm(Patos)	n(SG)	n(Patos)	Ur(SG)	Ur(Patos)	Vv(SG)	Vv(Patos)
1975	1	1	34.3	34.8	23.2	24.1	10.0	4.3	55.5	42.5	2.6	5.1
1975	1	2	34.0	35.6	22.6	22.9	7.9	7.1	53.3	44.5	2.9	5.2
1975	1	3	35.1	35.6	23.8	22.0	8.4	8.2	48.0	46.3	3.0	5.6
1975	1	4	35.7	36.2	21.4	25.4	11.5	8.9	42.8	47.8	4.1	4.6
1975	1	5	35.4	35.8	19.4	25.1	11.5	7.9	47.0	45.8	1.4	5.0
1975	1	6	35.8	36.8	22.5	24.1	11.0	9.5	50.5	47.0	3.5	4.1
1975	1	7	35.0	34.2	22.0	25.6	6.2	4.7	53.5	51.3	2.9	4.1
1975	1	8	34.0	33.6	21.4	23.5	5.9	2.4	46.8	61.8	3.4	3.3
1975	1	9	35.4	33.7	21.2	23.3	5.3	3.5	47.0	65.8	4.5	1.8
1975	1	10	35.3	34.0	21.0	22.7	7.2	5.5	48.8	47.3	3.1	3.2
1975	1	11	36.0	35.5	21.8	22.9	10.9	10.3	43.0	35.8	3.3	4.0
1975	1	12	36.3	36.4	20.3	21.8	11.3	11.5	40.3	32.5	3.9	2.3
1975	1	13	36.2	35.5	21.6	23.9	11.1	7.7	41.8	66.8	6.4	2.9
1975	1	14	33.3	32.1	22.4	22.0	10.8	6.2	43.8	57.3	2.9	5.0
1975	1	15	33.4	34.6	21.9	22.5	4.0	7.7	63.0	53.0	3.2	3.8
1975	1	16	35.3	36.2	21.6	22.8	9.6	10.1	53.3	40.5	5.6	5.2
1975	1	17	36.3	35.6	20.4	23.0	11.3	10.3	45.3	49.5	2.7	5.6
1975	1	18	35.8	36.3	23.0	24.0	9.0	10.6	50.5	48.3	2.7	3.5
1975	1	19	33.3	35.5	21.8	24.1	3.8	9.0	61.3	45.8	2.6	3.2
1975	1	20	32.3	36.2	22.8	23.1	1.9	8.2	58.3	38.3	2.7	2.8
1975	1	21	27.8	37.6	21.4	22.0	0.9	10.8	81.3	38.0	1.8	2.7
1975	1	22	31.6	36.0	20.5	21.9	3.8	8.9	74.0	54.8	1.8	1.2
1975	1	23	26.0	36.0	21.1	23.0	0.1	8.3	85.3	59.8	1.5	3.5
1975	1	24	32.2	36.6	21.6	22.6	5.8	10.5	61.5	40.0	2.1	3.9
1975	1	25	33.7	36.9	21.4	22.4	11.6	11.4	58.8	36.8	3.8	4.4
1975	1	26	32.8	36.7	21.0	22.3	11.7	10.1	62.0	43.8	2.6	5.5
1975	1	27	33.3	36.1	23.0	23.7	10.9	6.8	61.3	51.3	3.2	5.1
1975	1	28	32.0	36.6	24.0	24.5	8.1	9.2	67.0	50.0	1.9	5.6
1975	1	29	31.4	36.6	20.7	25.1	6.2	7.6	72.0	52.8	1.6	7.4
1975	1	30	32.2	36.8	19.0	24.9	9.1	7.1	64.5	43.0	4.5	6.6
1975	1	31	32.1	36.5	21.4	23.8	10.5	9.8	64.0	38.5	2.9	4.7

Dessa forma, utilizaram-se combinações entre as estações com dados faltantes e estações próximas com um período de dados completos, para as devidas correlações. Nesse sentido, foram utilizadas a estação de São Gonçalo, com dados completos, com a estação próxima de Patos, com dados faltantes; a estação de Monteiro com a de Patos, a estação de João pessoa com Areia e pôr fim a estação de Campina Grande com a de Areia.

Inicialmente, foi executado o comando “mstats()” no software estatístico R, para que fosse apresentada a estatística de dados faltantes, como a quantidade e porcentagem de dados faltantes nas variáveis meteorológicas do IMMET, que serão usadas no cálculo da ET_o pelo método PMFAO-56 em cada estação convencional do estado da Paraíba.

Já sabendo de todas as porcentagens de dados faltantes, Tabela 2, pode-se e criar uma variável “f” que irá conter todas as variáveis a serem preenchidas com o seguinte comando “f ()” e depois “i <- mninput()”, agora se aplicar o comando “() <- predict(i)” para realizar uma predição dos dados e preencher os locais sem dados. Já com a série preenchida é possível exportá-la para uma planilha do Excel utilizado o comando “write.xlsx()” que irá salvar a planilha com todos os dados preenchidos no local indicado.

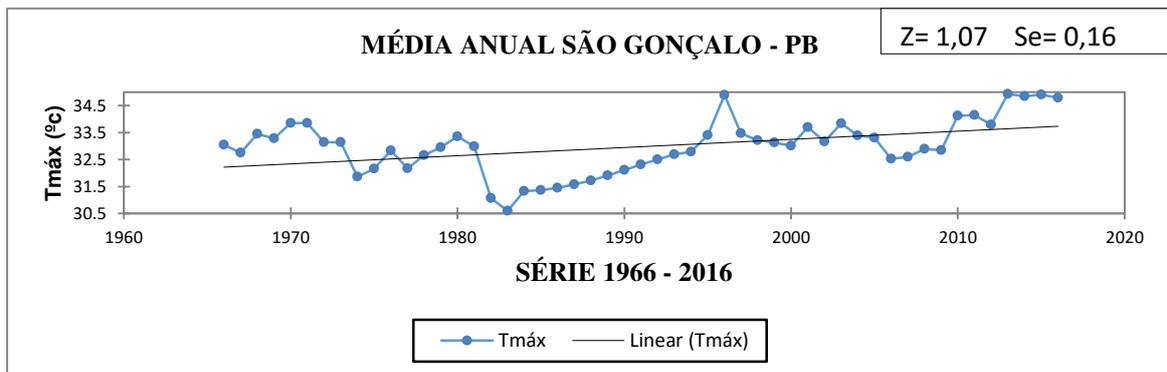
5.3 ANÁLISE DE TENDÊNCIA

5.3.1 Temperatura máxima

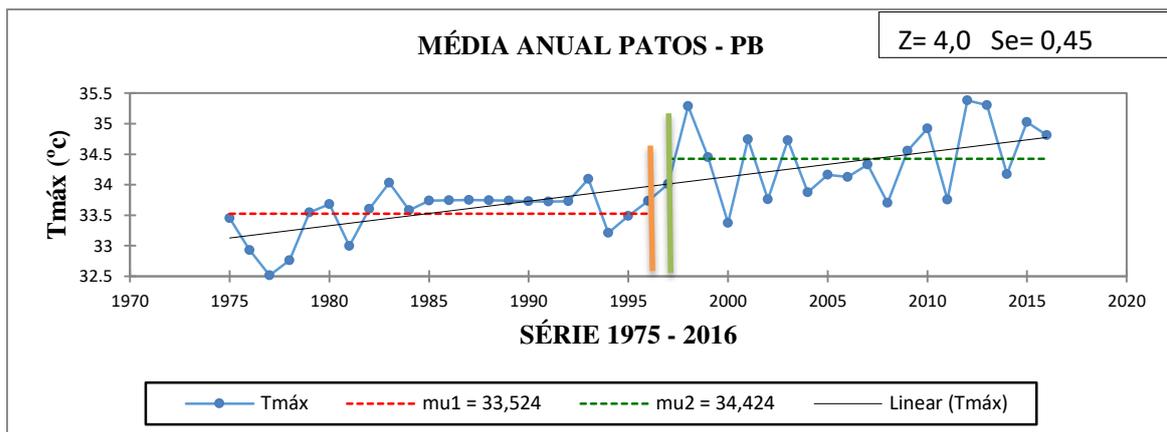
Para os valores médios anuais das temperaturas máxima diárias do ar, as únicas localidades que não apresentaram tendências estatisticamente significantes foram São Gonçalo e Areia, sendo detectado um crescimento em todas as demais, com um nível de significância de 0,05. As taxas de crescimento encontradas para as máximas se situaram entre, 0,19 °C em Monteiro e 0,49 °C ano^{-1} em Campina Grande, o que resultou na média de 0,34 °C ano^{-1} . Esses resultados estão visualmente representados nos Figuras 8 e 9, onde são apresentadas a reta estimada pelo método de Sen, as retas de mudança (linha pontilhada laranja e verde) e a reta de regressão linear (linha contínua preta).

Pode-se verificar que no município de Patos houve uma tendência de crescimento da ordem de $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ década}^{-1}$ a partir do ano 1997; em Monteiro, a partir de 1988, da ordem de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ década}^{-1}$ em Campina Grande, a partir do ano de 1987, da ordem de $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ década}^{-1}$; e em João Pessoa, a partir do ano de 1993, da ordem de $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ década}^{-1}$. Já na escala sazonal, houve tendências significativas positivas em todas as estações do ano, em todos os lugares, exceto em Areia em que não houve tendência significativa no verão. Entretanto, o outono e o inverno apresentaram tendência de declínio, e a primavera tendência de aumento, como se pode observar na Tabela 9.

a)



b)



c)

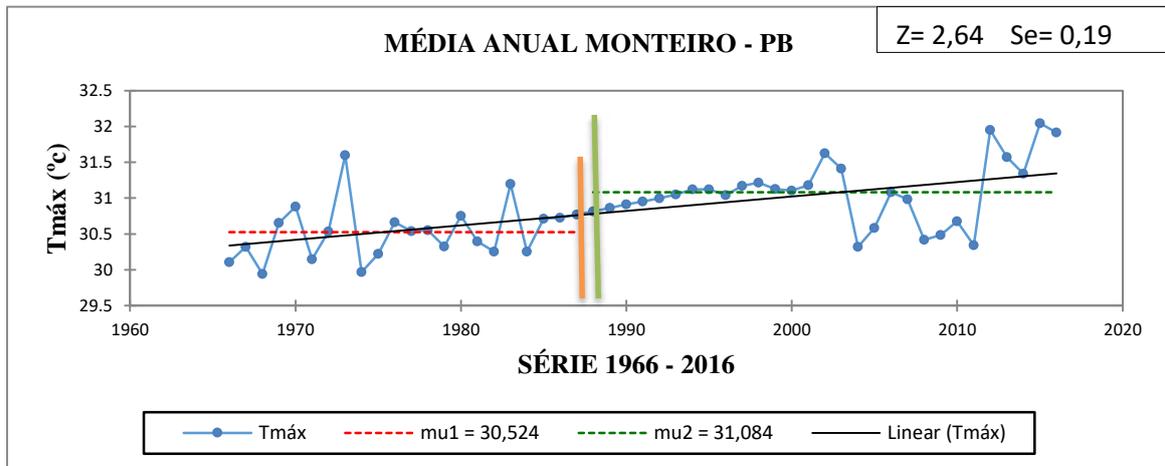
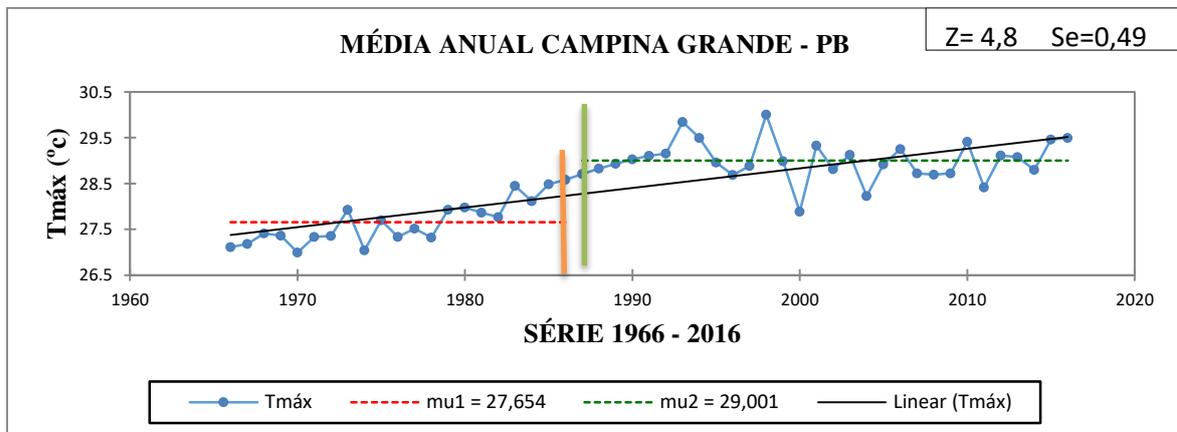
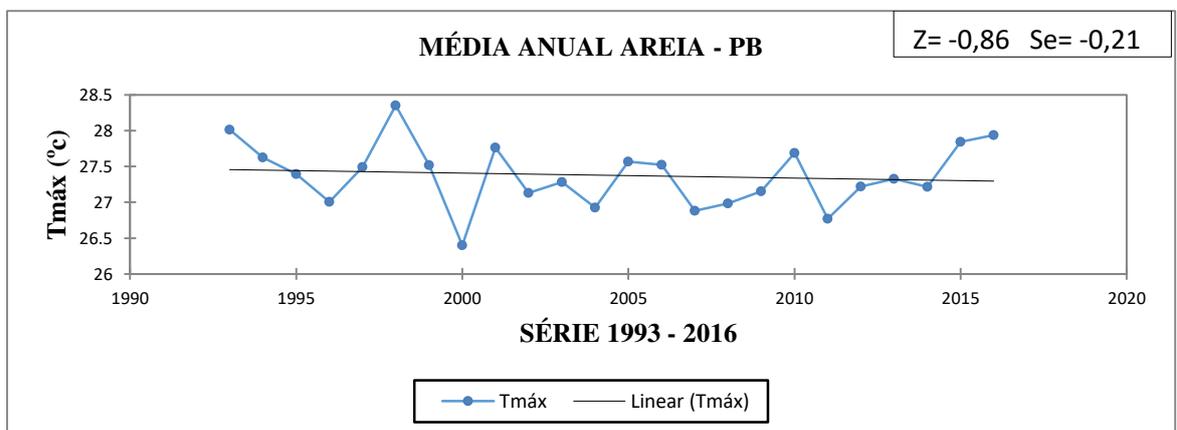


Figura 8 - Séries temporais de (Tmáx) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de São Gonçalo, Patos e Monteiro para o período de 1966 a 2016, com exceção de Patos que vai de 1975 a 2016.

d)



e)



f)

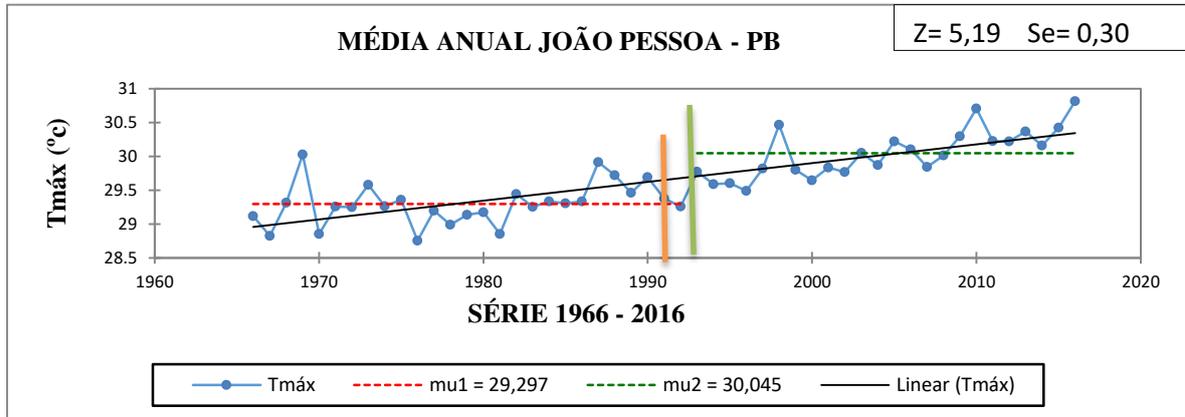


Figura 9 - Séries temporais de (Tmax) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de Campina Grande, Areia e João Pessoa para o período de 1966 a 2016, com exceção de areia que vai de 1993 a 2016.

Na Tabela 9 estão os resultados referentes aos testes estatísticos de Mann-Kendall (Z), estimador de Sen e o sinal da tendência (Tendência), para a temperatura máxima (Tmax) na escala sazonal e anual para toda a região de estudo.

Ao considerar a escala anual, verifica-se que nas localidades de Patos, Monteiro, Campina Grande e João Pessoa, foram detectadas tendências positivas significativas, conforme demonstra o teste estatístico de Mann-Kendall (Z), apresentando um $Z > 1,96$, com um nível de significância de 0,05. O mesmo se verifica na escala sazonal em todas as localidades, exceto em Areia nas estações do verão, outono e inverno.

Tabela 9 - Teste estatístico de Mann-Kendall (Z) e do estimador de Sen (magnitude) aplicados às séries temporais anuais e sazonais da temperatura máxima (T_{max}) para João pessoa, Areia, Campina Grande, Monteiro, patos e São Gonçalo, considerando nível de 5% de significância (p-valor <0,05) para o período de 1966 a 2016, excerto Areia que vai de 1993 a 2016 e Patos que vai de 1975 a 2016.

Var.	Série	SÃO GONÇALO			PATOS			MONTEIRO		
		Z _s	Tendência α=0,05	Se	Z _s	Tendência α=0,05	Se	Z _s	Tendência α=0,05	Se
T _{máx} (°C)	Verão	13,05	S+	0,001	18,05	S+	0,001	25,90	S+	0,001
	Outono	12,68	S+	0,001	14,19	S+	0,001	22,96	S+	0,001
	Inverno	17,85	S+	0,001	15,74	S+	0,001	17,53	S+	0,001
	Primavera	21,85	S+	0,001	25,60	S+	0,002	24,00	S+	0,001
	Anual	01,07	NS	0,160	03,76	S+	0,454	02,64	S+	0,001
Var.	Série	CAMPINA GRANDE			AREIA			JOÃO PESSOA		
		Z _s	Tendência α=0,05	Se	Z _s	Tendência α=0,05	Se	Z _s	Tendência α=0,05	Se
T _{máx} (°C)	Verão	28,06	S+	0,001	1,45	NS	0,000	36,0	S+	0,001
	Outono	21,65	S+	0,001	-3,00	S-	-0,001	23,84	S+	0,001
	Inverno	18,19	S+	0,001	-10,4	S-	-0,002	30,87	S+	0,002
	Primavera	35,87	S+	0,001	6,46	S+	0,002	41,25	S+	0,001
	Anual	04,80	S+	0,496	0,86	NS	-0,219	05,19	S+	0,306

NS = Tendência não significativa; S+ = Tendência significativa positiva a 5%; S- = Tendência significativa negativa a 5%.

Aumentos significativos nas temperaturas média, máxima e mínima já foram observados em vários estudos no Brasil. Victoria et al. (1998) detectaram aquecimento na região Amazônica que chegou a +0,63 °C/100 anos, enquanto a taxa de crescimento encontrada por Marengo (2003) alcançou +0,85/100 anos. Já Silva (2004) e Lima et al. (2010) verificaram no Nordeste do Brasil uma tendência estatisticamente significativa de aumento da temperatura máxima anual com aumentos médios de 0,50 °C por década.

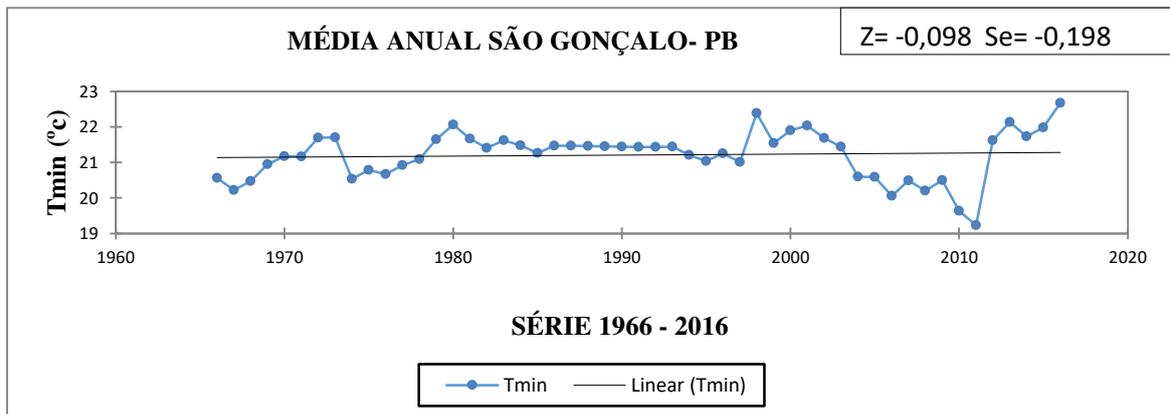
5.3.2 Temperatura mínima

Para os valores médios anuais da temperatura mínima diária do ar, as localidades que apresentaram tendências estatisticamente significantes foram Monteiro, Campina Grande e João Pessoa, em que se detectou um crescimento com um nível de significância de 0,05. As taxas de crescimento encontradas para as mínimas se situaram em torno de 0,47 °C em Monteiro e 0,50 °C ano⁻¹ em João Pessoa, ficando a média em 0,48 °C ano⁻¹. Esses resultados estão visualmente representados nos Figura 10 e 11, em que são apresentadas a reta estimada pelo

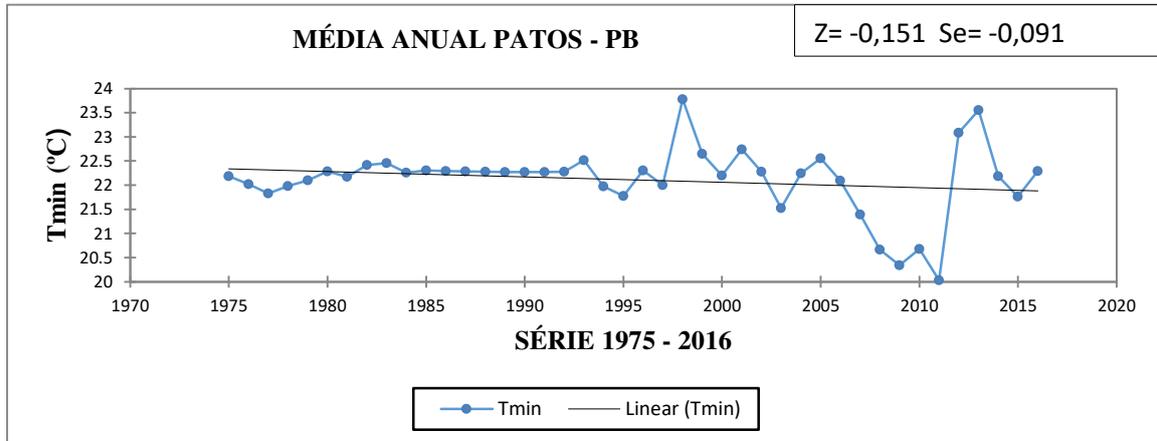
método de Sen, as retas de mudança (linha pontilhada laranja e verde) e a reta de regressão linear (linha contínua preta).

Pode-se verificar que no município de Monteiro houve uma tendência de crescimento da ordem de $0,4 \text{ } ^\circ\text{C década}^{-1}$ a partir do ano 1984; em Campina Grande esse aumento se registrou a partir de 1988, da ordem de $0,5 \text{ } ^\circ\text{C década}^{-1}$ e em João Pessoa, a partir do ano de 1991, da ordem de $0,4 \text{ } ^\circ\text{C década}^{-1}$. Os municípios de São Gonçalo, Patos e Areia não apresentaram tendência, já que o teste de Mann-Kendall (Z) mostrou valores abaixo do crítico $Z < 1,96$ para o nível de significância de 0,05. Já na escala sazonal, pode-se destacar que houve tendência significativa de aumento na T_{min} em São Gonçalo no outono e na primavera; em Monteiro ocorreu aumento em todas as estações do ano; em Patos houve uma tendência negativa no verão, inverno e primavera. Já em Campina Grande, houve uma tendência de aumento na T_{min} em todas as estações do ano, assim como em João Pessoa; porém, em Areia houve tendência de aumento da T_{min} no verão, outono e na primavera e uma tendência negativa no inverno, como se pode observar na Tabela 5.

a)



b)



c)

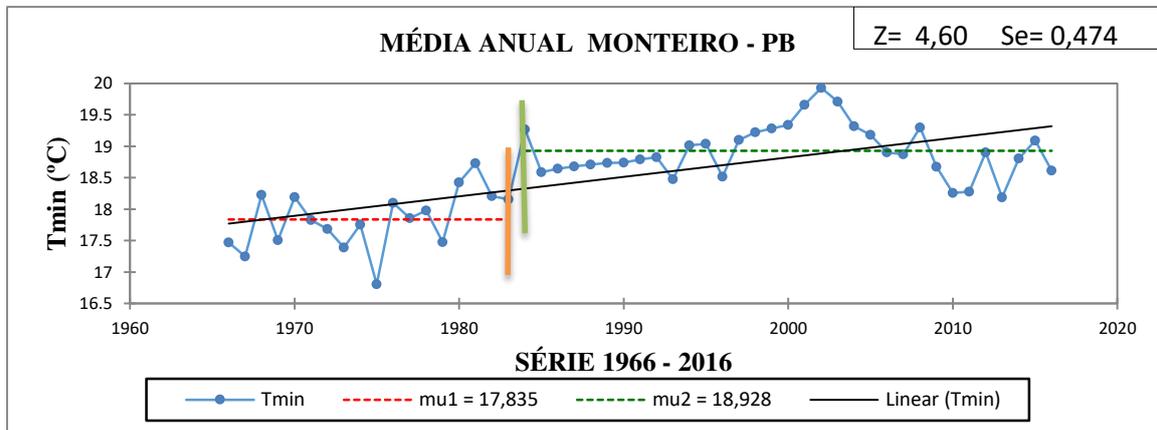
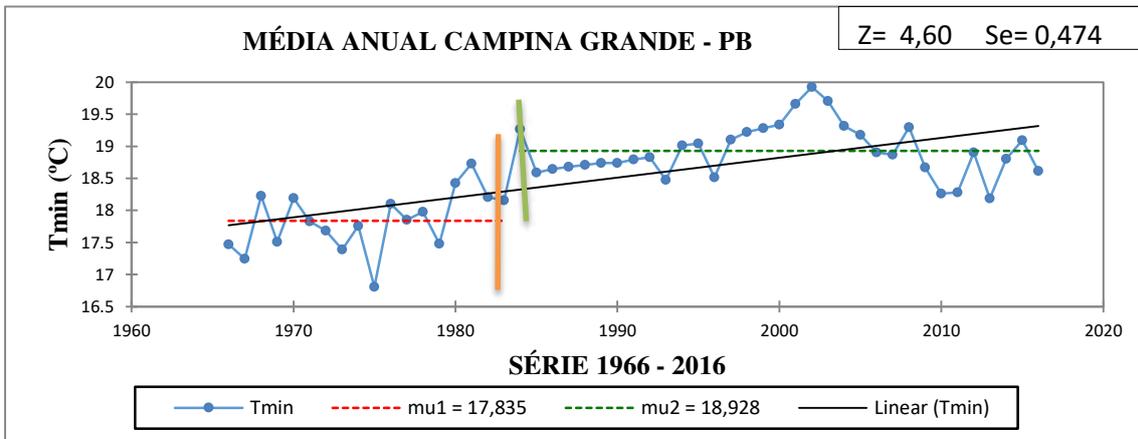
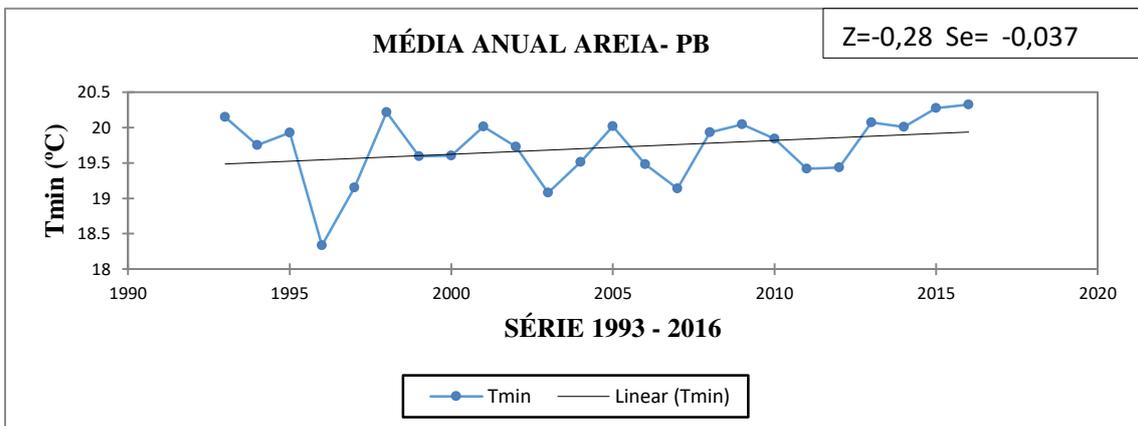


Figura 10 - Séries temporais de (Tmin) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de São Gonçalo, patos e Monteiro para o período de 1966 a 2016, com exceção de Patos que vai de 1975 a 2016

d)



e)



f)

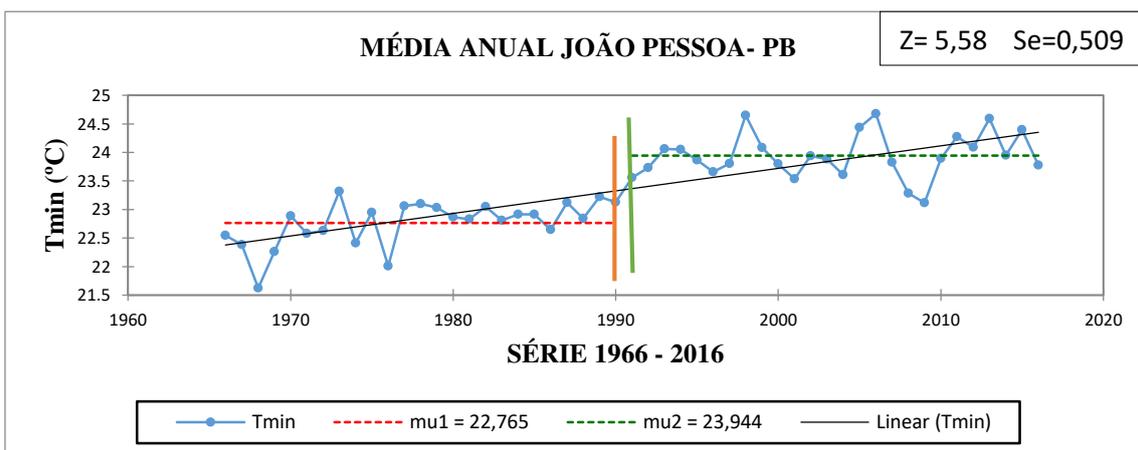


Figura 11 - Séries temporais de (Tmin) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de Campina Grande, Areia e João Pessoa para o período de 1966 a 2016, com exceção de Patos que vai de 1975 a 2016

Na Tabela 9 são mostrados os resultados referentes aos testes estatísticos de Mann-Kendall (Z), estimador de Sen (Sen) e o sinal da tendência (Tendência), para a temperatura mínima (Tmin) na escala sazonal e anual para toda região de estudo.

Tabela 9 - Teste estatístico de Mann-Kendall (Z) e do estimador de Sen (magnitude) aplicados às séries temporais Anuais e sazonais da temperatura mínima (Tmin) para João Pessoa, Areia, Campina Grande, Monteiro, Patos e São Gonçalo, considerando nível de 5% de significância (p-valor <0,05) para o período de 1966 a 2016, exceto Areia que vai de 1993 a 2016 e Patos que vai de 1975 a 2016.

Var.	Série	SÃO GONÇALO			PATOS			MONTEIRO		
		Z _s	Tendência α=0,05	Se	Z _s	Tendência α=0,05	Se	Z _s	Tendência α=0,05	Se
Tmin (°C)	Verão	0,56	NS	0,001	-2,22	S-	-0,001	30,25	S+	0,001
	Outono	2,43	S+	0,001	0,76	NS	0,000	28,16	S+	0,001
	Inverno	-0,77	NS	-0,001	-9,78	S-	-0,001	13,52	S+	0,001
	Primavera	5,26	S+	0,001	-11,06	S-	-0,001	26,0	S+	0,001
	Anual	-0,09	NS	-0,198	-0,151	NS	-0,091	4,60	S+	0,474
Var.	Série	CAMPINA GRANDE			AREIA			JOÃO PESSOA		
		Z _s	Tendência α=0,05	Se	Z _s	Tendência α=0,05	Se	Z _s	Tendência α=0,05	Se
Tmin (°C)	Verão	43,49	S+	0,006	2,54	S+	0,002	35,8	S+	0,001
	Outono	34,8	S+	0,005	2,95	S+	0,002	26,24	S+	0,002
	Inverno	20,7	S+	0,003	-2,83	S-	-0,001	16,94	S+	0,002
	Primavera	38,9	S+	0,008	13,0	S+	0,002	34,69	S+	0,002
	Anual	5,19	S+	0,507	0,28	NS	-0,037	5,58	S+	0,509

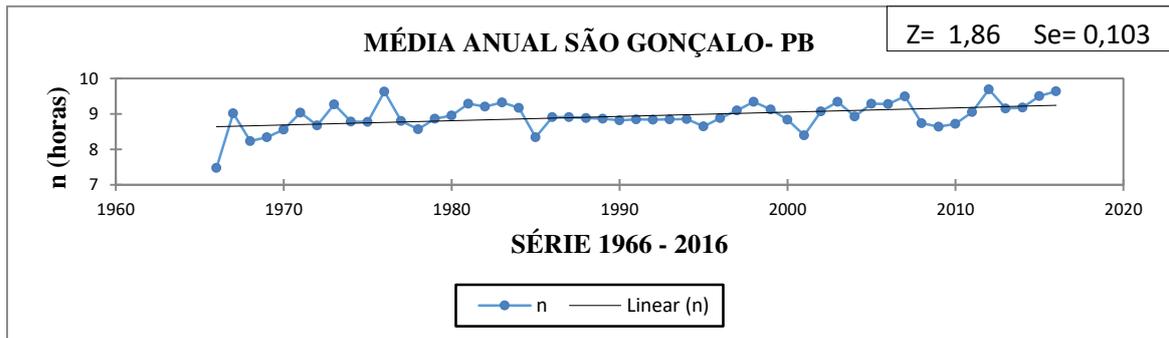
NS = Tendência não significativa; S+ = Tendência significativa positiva a 5%; S- = Tendência significativa negativa a 5%.

5.3.3 Insolação

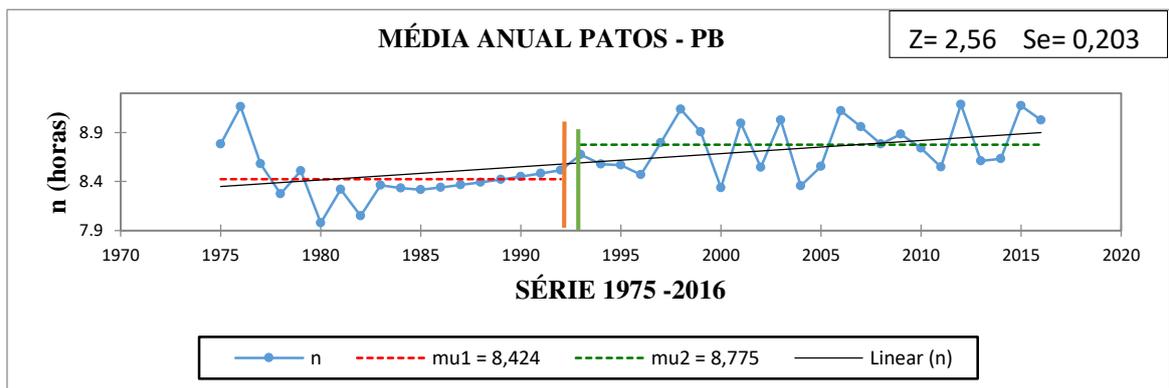
Para os valores médios anuais de insolação (n), as localidades que apresentaram tendência estatisticamente significantes foram Patos e Campina Grande, sendo detectado uma elevação com um nível de significância de 0,05. As taxas de elevação encontradas para Patos tornaram-se significativas a partir de 1993, com um aumento de 0,3 horas por década. Já em Campina Grande a tendência de elevação começou a partir de 1983, com um crescimento de 0,7 horas por década, as demais localidades não apresentaram tendência significativa. Estes resultados sugerem que o número de horas de brilho solar na região tem aumentado com o passar do tempo, favorecendo diretamente na incidência da radiação solar global, que por sua vez contribuirá para o aumento da temperatura e diminuição da precipitação nestes períodos.

Esses resultados estão visualmente representados nos Figuras 12 e 13, onde são apresentadas a reta estimada pelo método de Sen, as retas de mudança (linha pontilhada laranja e verde) e a reta de regressão linear (linha contínua preta).

a)



b)



c)

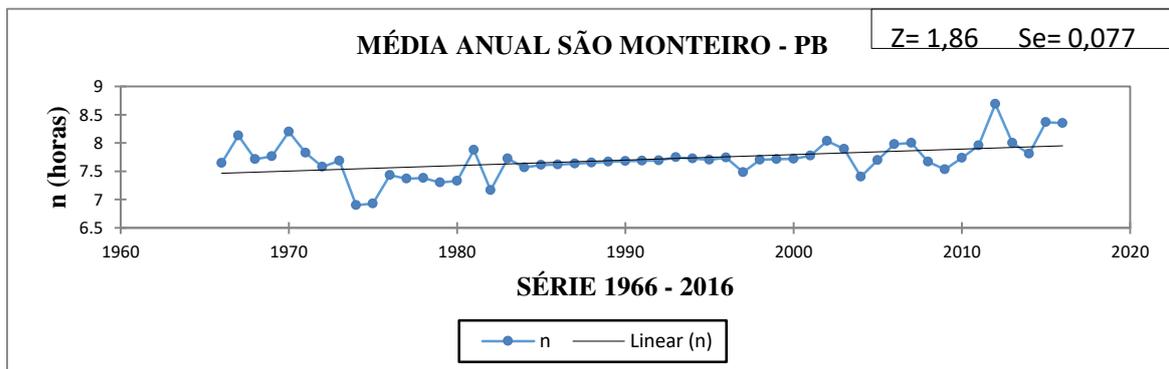
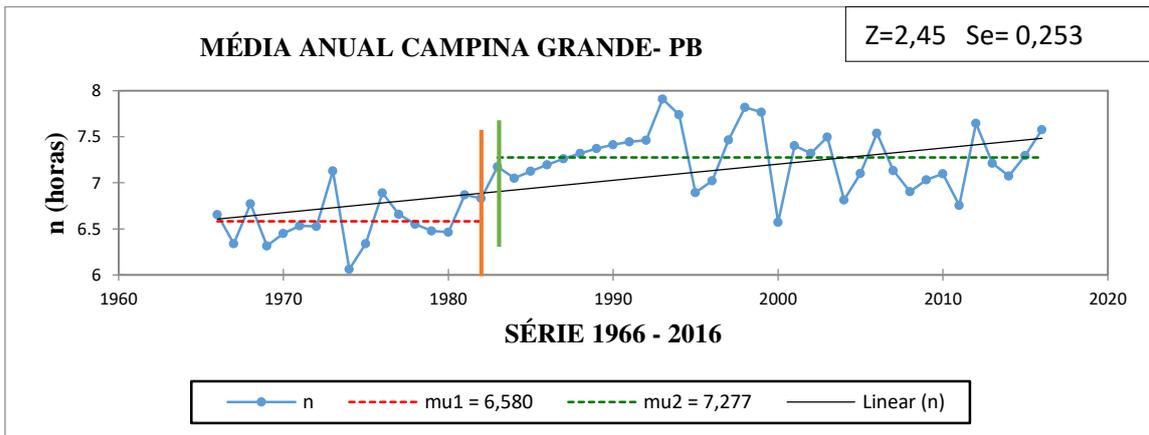
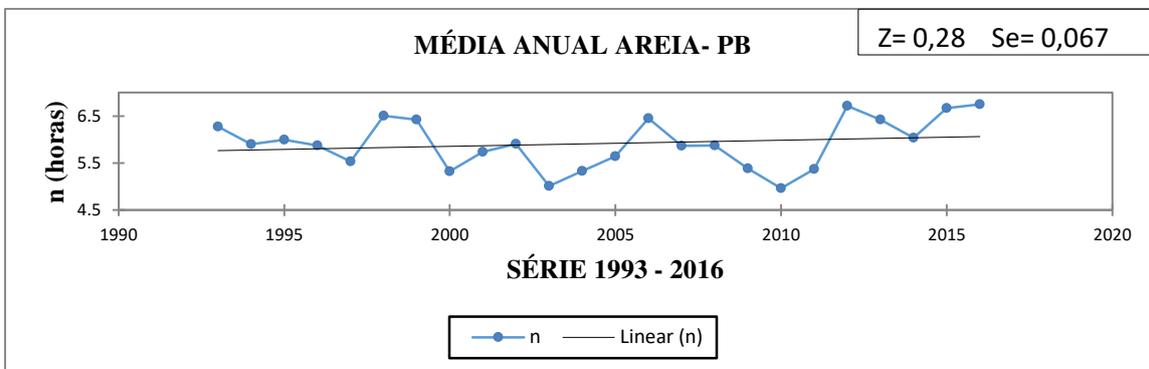


Figura 12 - Séries temporais de (n) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de São Gonçalo, patos e Monteiro para o período de 1966 a 2016, com exceção de Patos que vai de 1975 a 2016.

d)



e)



f)

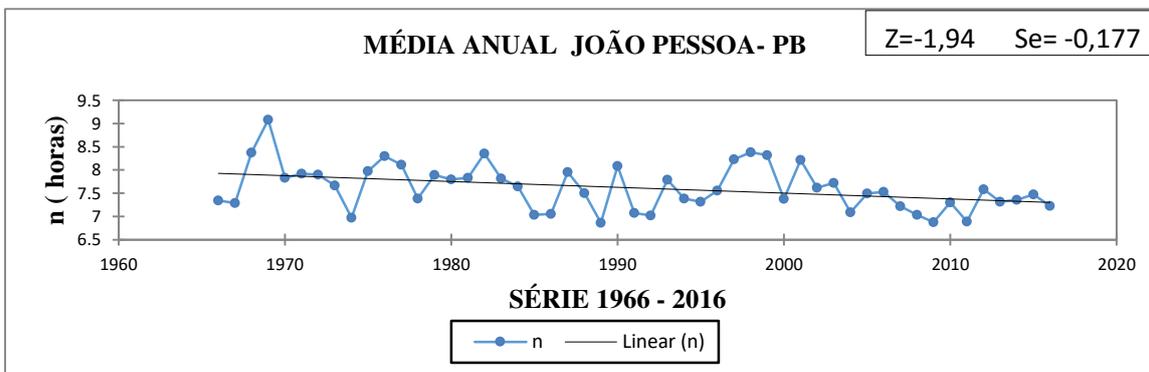


Figura 13 - Séries temporais de (n) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de Campina Grande, Areia e João Pessoa para o período de 1966 a 2016, com exceção de areia que vai de 1993 a 2016.

Na análise da série de dados de insolação (n) na escala sazonal pode-se observar que, na localidade de São Gonçalo, constatou-se uma tendência de aumento de $0,1$ horas década⁻¹ no inverno e na primavera, enquanto em Patos, Monteiro e Campina Grande houve um aumento de $0,1$ horas década⁻¹ em todas as estações do ano. Já em Areia, constatou-se uma tendência de aumento de $0,2$ horas

década⁻¹ no verão e 0,1 horas década⁻¹ no inverno e primavera. Também identificou-se uma leve tendência de declínio de -0,2 horas década⁻¹ no outono, na localidade de João Pessoa; apenas o outono e a primavera tiveram uma leve tendência de declínio na ordem de -0,2 horas década⁻¹, como pode ser observado no Tabela 10.

Tabela 10 - Teste estatístico de Mann-Kendall (Z) e do estimador de Sen (magnitude) aplicados às séries temporais Anuais e sazonais de insolação (n) para João pessoa, Areia, Campina Grande, Monteiro, patos e São Gonçalo, considerando nível de 5% de significância (p-valor <0,05) para o período de 1966 a 2016, excerto Areia que vai de 1993 a 2016 e Patos que vai de 1975 a 2016.

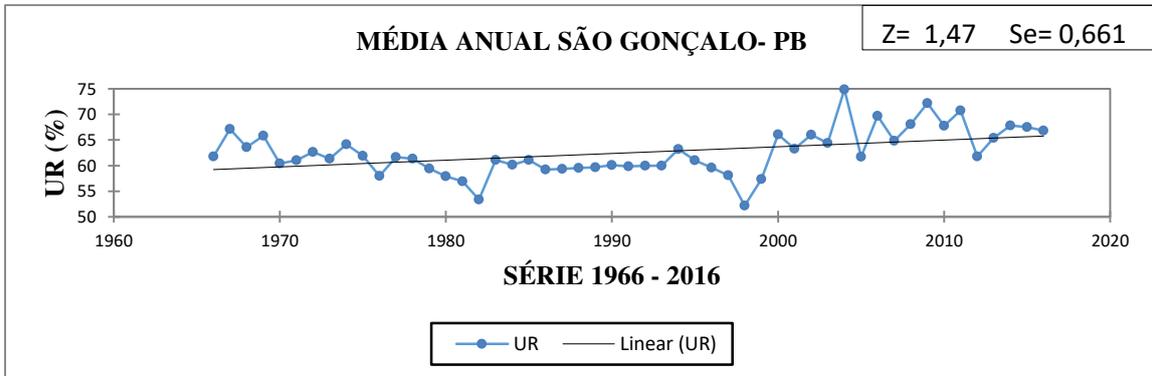
Var.	Série	SÃO GONÇALO			PATOS			MONTEIRO		
		Z _s	Tendência α=0,05	Se	Z _s	Tendênci a α=0,05	Se	Z _s	Tendênci a α=0,05	Se
n (horas)	Verão	1,77	NS	0,001	11,2	S+	0,001	20,3	S+	0,001
	Outono	0,21	NS	0,001	7,28	S+	0,001	18,43	S+	0,001
	Inverno	5,0	S+	0,001	14,96	S+	0,001	17,88	S+	0,001
	Primavera	11,7	S+	0,001	16,48	S+	0,001	20,18	S+	0,001
	Anual	1,86	NS	0,103	2,56	S+	0,203	1,86	NS	0,077
Var.	Série	CAMPINA GRANDE			AREIA			JOÃO PESSOA		
		Z _s	Tendência α=0,05	Se	Z _s	Tendênci a α=0,05	Se	Z _s	Tendênci a α=0,05	Se
n (horas)	Verão	13,5	S+	0,001	2,95	S+	0,002	-1,38	NS	0,000
	Outono	10,4	S+	0,001	-5,91	S-	-0,002	-5,44	S-	-0,002
	Inverno	10,0	S+	0,002	2,46	S+	0,001	-0,133	NS	0,000
	Primavera	14,4	S+	0,004	2,18	S+	0,001	-7,72	S-	-0,002
	Anual	2,45	S+	0,253	0,28	NS	0,067	1,94	NS	-0,177

NS = Tendência não significativa; S+ = Tendência significativa positiva a 5%; S- = Tendência significativa negativa a 5%.

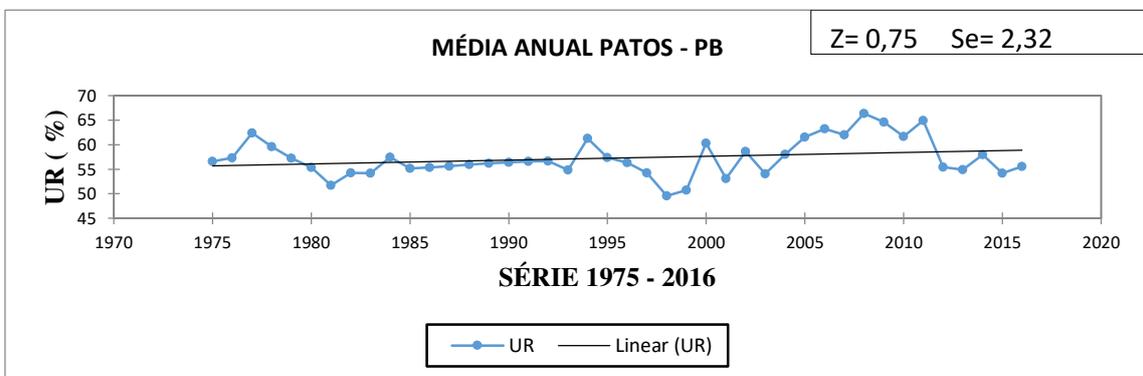
5.3.4 Umidade relativa média

Observou-se que a única localidade que apresentar tendência estatisticamente significativa de umidade relativa (UR) na escala anual foi Campina Grande, com um nível de significância de 0,05, apresentando uma tendência de declínio médio de -2,0 % por década. Essa mudança começou a ocorrer a partir do ano de 1979, conforme a (Figura 15d) em que são apresentadas a reta estimada pelo método de Sen, as retas de mudança (linha pontilhada laranja e verde) e a reta de regressão linear (linha contínua preta). Comportamentos similares foram observados por Alencar et al. (2012), na região Sudeste, e por Silva (2004), na região Nordeste. Os autores verificaram redução acentuada de umidade relativa média anual, associada ao aumento conjunto da temperatura mínima e máxima.

a)



b)



c)

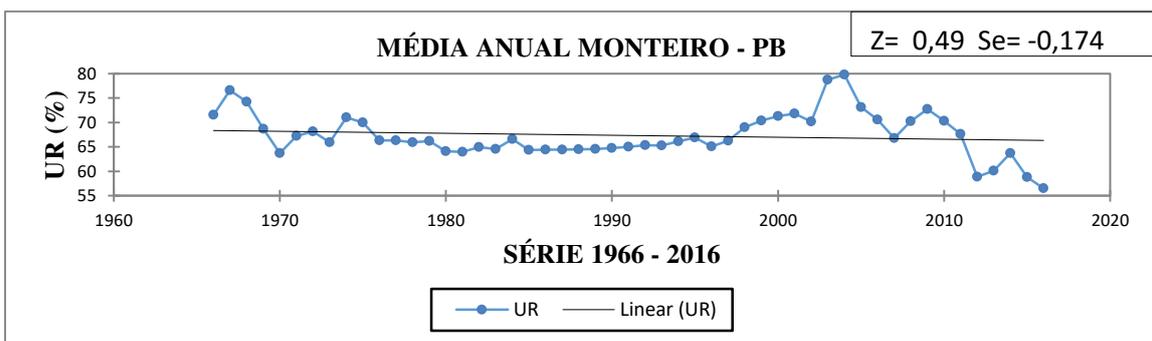
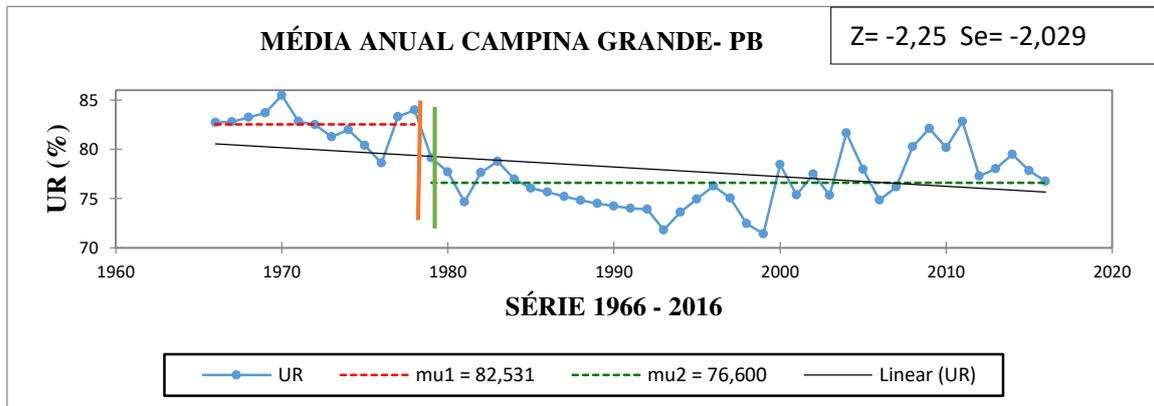
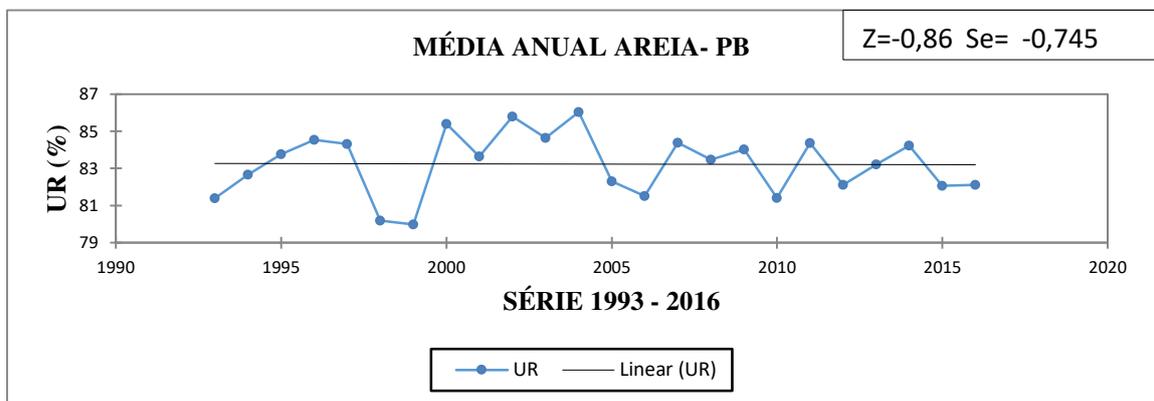


Figura 14 - Séries temporais de (UR) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de São Gonçalo, patos e Monteiro para o período de 1966 a 2016, com exceção de Patos que vai de 1975 a 2016

d)



e)



f)

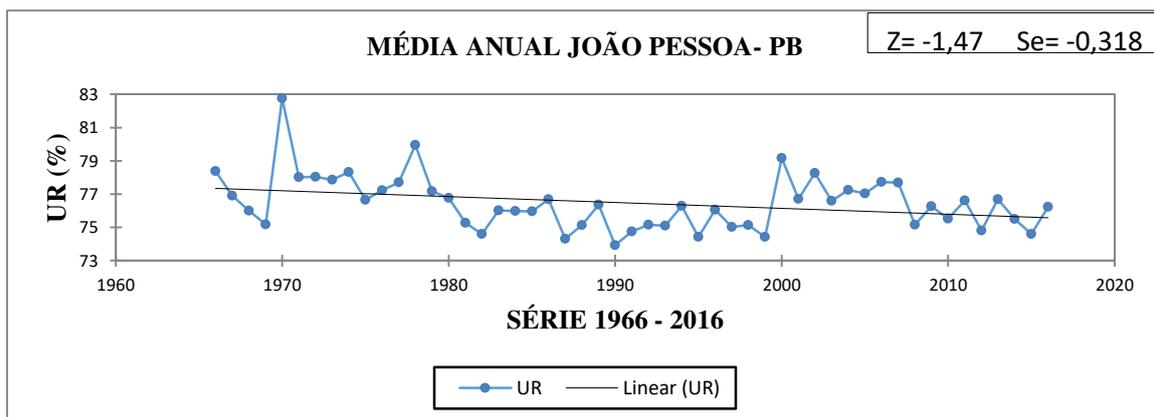


Figura 15 - Séries temporais de (UR) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de Campina Grande, Areia e João Pessoa para o período de 1966 a 2016, com exceção de areia que vai de 1993 a 2016.

Na análise da série dos dados de umidade relativa (UR), na escala sazonal, na localidade de São Gonçalo, constatou-se uma tendência de aumento de 0,2% por década em todas as estações do ano, enquanto em Patos houve um aumento de 0,1 % por década nas estações de verão, outono e inverno. Em Monteiro, constatou-se uma tendência de declínio de -0,1 % por década no verão e na primavera, porém, no outono, observa-se um pequeno aumento de 0,1% por década. A localidade de Campina Grande apresentou um declínio de -0,1 % por década em todas as estações do ano; observa-se o mesmo em Areia, no verão e na primavera, só que com um declínio de -0,2% por década, diferentemente do outono e inverno que apresentaram um aumento de 0,2% por década, enquanto João Pessoa apresentou declínio de -0,1% por década no verão e -0,2% por década no inverno e na primavera, como pode ser observado na Tabela 11.

Tabela 11 - Teste estatístico de Mann-Kendall (Z) e do estimador de Sen (magnitude) aplicados às séries temporais Anuais e sazonais da umidade relativa (UR) para João pessoa, Areia, Campina Grande, Monteiro, patos e São Gonçalo, considerando nível de 5% de significância (p-valor <0,05) para o período de 1966 a 2016, excerto Areia que vai de 1993 a 2016 e Patos que vai de 1975 a 2016.

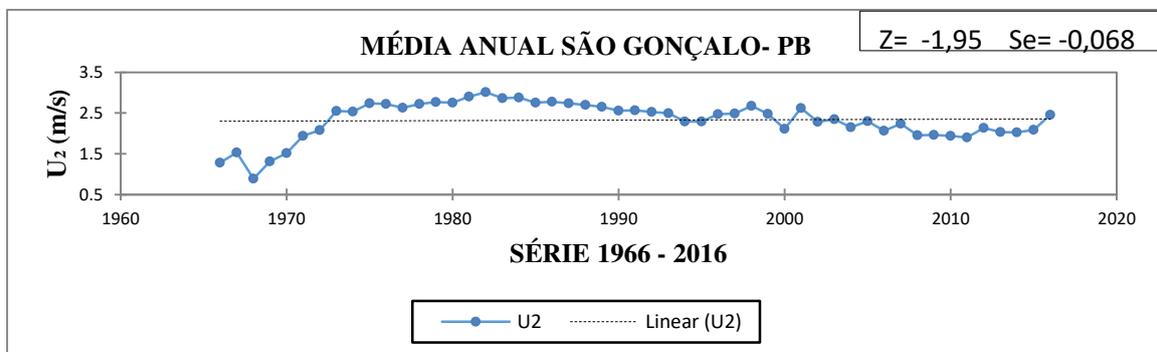
Var	Série	SÃO GONÇALO			PATOS			MONTEIRO		
		Z _s	Tendência α=0,05	Se	Z _s	Tendência α=0,05	Se	Z _s	Tendência α=0,05	Se
UR (%)	Verão	20,7	S+	0,002	9,94	S+	0,001	-3,24	S-	-0,001
	Outono	13,2	S+	0,002	12,87	S+	0,001	2,27	S+	0,001
	Inverno	3,95	S+	0,002	4,77	S+	0,001	1,26	NS	0,000
	Primavera	22,7	S+	0,002	1,48	NS	0,000	-8,55	S-	-0,001
	Anual	1,47	NS	0,661	0,75	NS	2,320	0,49	NS	-0,174
Var	Série	CAMPINA GRANDE			AREIA			JOÃO PESSOA		
		Z _s	Tendência α=0,05	Se	Z _s	Tendência α=0,05	Se	Z _s	Tendência α=0,05	Se
UR (%)	Verão	-15,94	S-	-0,001	-2,85	S-	-0,002	-9,47	S-	-0,001
	Outono	-14,36	S-	-0,001	2,13	S+	0,002	-1,55	NS	0,000
	Inverno	-13,40	S-	-0,001	3,00	S+	0,002	13,94	S-	-0,002
	Primavera	-25,81	S-	-0,001	-5,72	S-	-0,001	-9,19	S-	-0,002
	Anual	-2,250	S-	-2,029	-0,86	NS	-0,745	-1,47	SN	-0,318

NS = Tendência não significativa; S+ = Tendência significativa positiva a 5%; S- = Tendência significativa negativa a 5%.

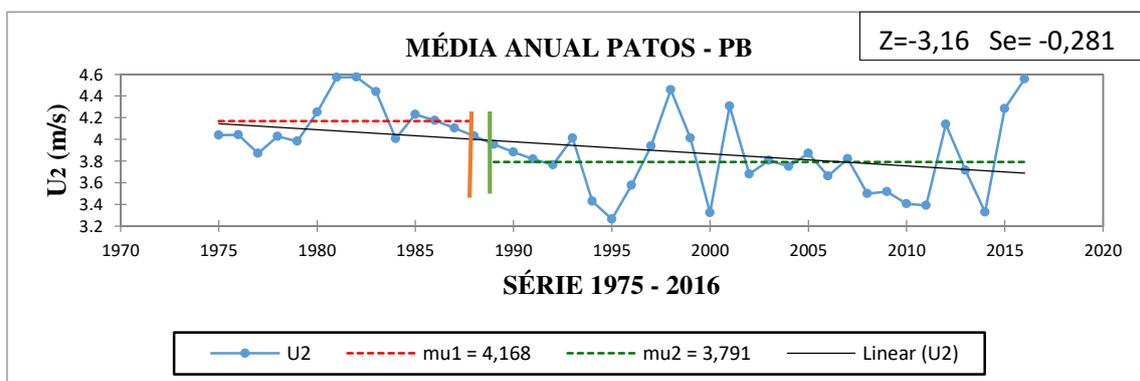
5.3.5 Velocidade do vento

Para a velocidade do vento a dois metros de altura, as localidades que apresentaram tendência estatisticamente significativa na escala anual foram Patos e Monteiro. Todas foram detectadas com um nível de significância ($\alpha = 0,05$), mostrando-se uma taxa de declínio variando entre $-0,37 \text{ m s}^{-1} \text{ década}^{-1}$, a partir de 1989 em Patos. Já em Monteiro foi detectada um aumento de $1,1 \text{ m s}^{-1} \text{ década}^{-1}$, a partir do ano de 1981, as demais localidades não apresentaram tendência significativa, conforme a Figura 16, onde são apresentadas, a reta estimada pelo método de Sen, a reta de mudança (linha pontilhada laranja e verde) e a reta de regressão linear (linha contínua preta). Alencar et al. (2012) e Santos e Silva (2013) realizaram estudos dessa variável para a região sudeste (Uberaba-MG) e para a região nordeste do Brasil, respectivamente. Para a região sudeste foi observada tendência de aumento na velocidade do vento; para o Nordeste foi observada tendência de declínio.

a)



b)



c)

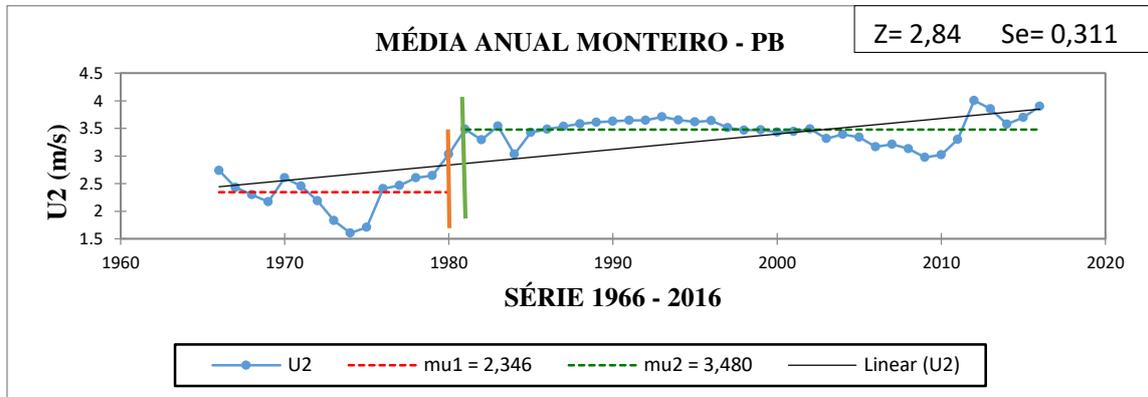
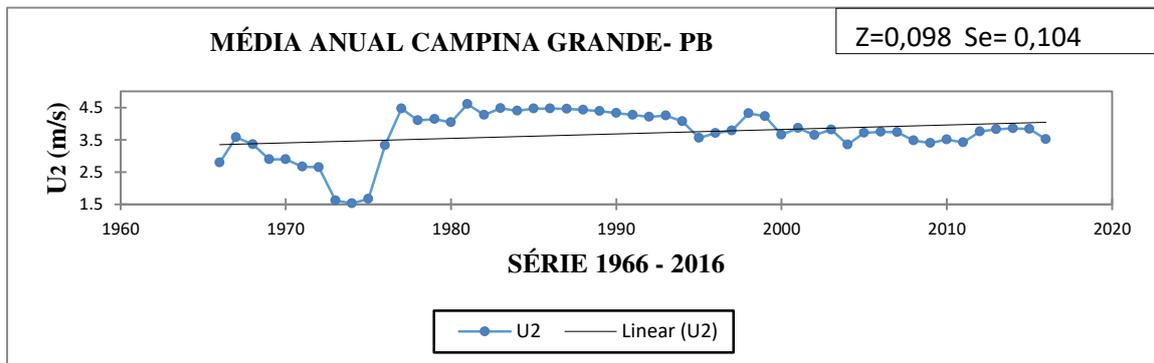
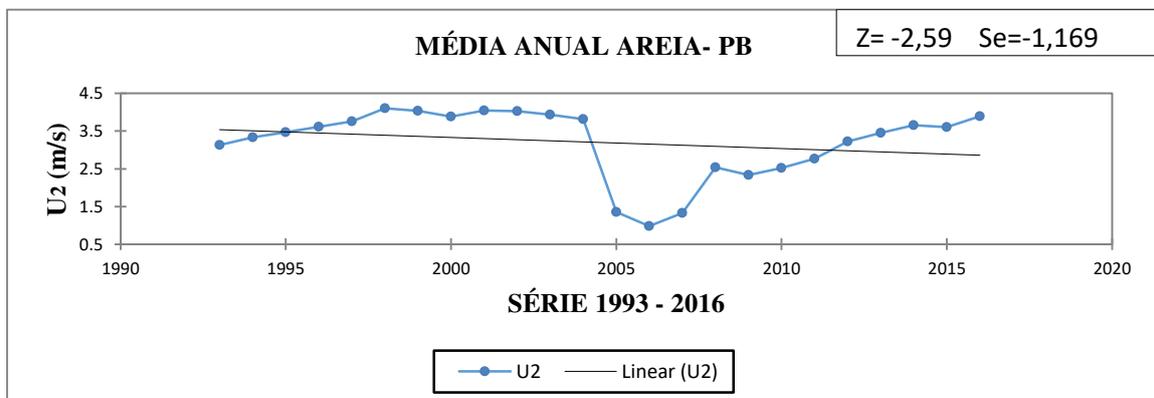


Figura 16 - Séries temporais de (U_2) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de São Gonçalo, patos e monteiro para o período de 1966 a 2016, com exceção de Patos que vai de 1975 a 2016

d)



e)



f)

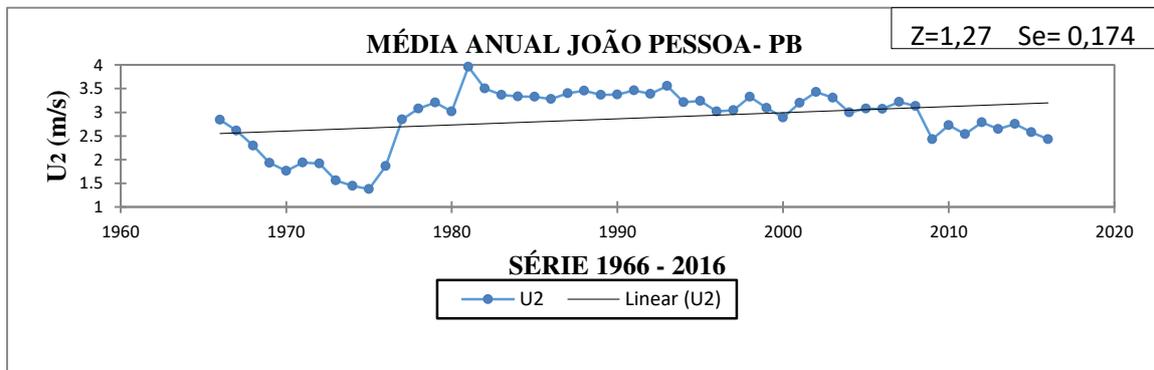


Figura 17- Séries temporais de (U_2) com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de Campina Grande, Areia e João Pessoa para o período de 1966 a 2016, com exceção de areia que vai de 1993 a 2016.

Na análise da série de dados da velocidade do vento a dois metros de altura (U_2) na escala sazonal, pode-se observar que as localidades de São Gonçalo, Patos e Areia apresentaram tendência de declínio em todas as estações do ano, variando entre de $-0,1m s^{-1} década^{-1}$, em São Gonçalo e Patos, respectivamente, e $-0,2m s^{-1} década^{-1}$ em Areia. Diferentemente, pode-se observar nas localidades de Monteiro e João Pessoa, que apresentaram um aumento variando entre $0,1m s^{-1} década^{-1}$ e $0,2m s^{-1} década^{-1}$ em todas as estações do ano. O mesmo observa-se em Campina Grande no verão e no outono, com taxa de aumento de $0,1m s^{-1} década^{-1}$; porém, na primavera, apresentou um leve declínio de $-0,1m s^{-1} década^{-1}$, como pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12 - Teste estatístico de Mann-Kendall (Z) e do estimador de Sen (magnitude) aplicados às séries temporais Anuais e sazonais da velocidade do vento a 2 m de altura para João pessoa, Areia, Campina Grande, Monteiro, patos e São Gonçalo, considerando nível de 5% de significância (p-valor <0,05) para o período de 1966 a 2016, excerto Areia que vai de 1993 a 2016 e Patos que vai de 1975 a 2016.

Var.	Série	SÃO GONÇALO			PATOS			MONTEIRO		
		Z _s	Tendência α=0,05	Se	Z _s	Tendênci a α=0,05	Se	Z _s	Tendênci a α=0,05	Se
U ₂ (m/s)	Verão	-8,55	S-	-0,001	-15,32	S-	-0,001	34,85	S+	0,001
	Outono	-9,15	S-	-0,001	-16,87	S-	-0,001	25,27	S+	0,001
	Inverno	-3,80	S-	-0,001	-5,00	S-	-0,001	23,30	S+	0,001
	Primavera	-5,21	S-	-0,001	-6,83	S-	-0,001	35,19	S+	0,001
	Anual	-1,95	NS	-0,068	-3,16	S-	-0,281	2,84	S+	0,311
Var.	Série	CAMPINA GRANDE			AREIA			JOÃO PESSOA		
		Z _s	Tendência α=0,05	Se	Z _s	Tendênci a α=0,05	Se	Z _s	Tendênci a α=0,05	Se
U ₂ (m/s)	Verão	7,87	S+	0,001	-6,87	S-	-0,002	8,07	S+	0,002
	Outono	4,09	S+	0,001	-7,51	S-	-0,002	10,08	S+	0,003
	Inverno	-1,54	NS	0,000	-2,44	S-	-0,001	12,81	S+	0,001
	Primavera	-4,71	S-	-0,001	-5,00	S-	-0,002	4,88	S+	0,002
	Anual	0,098	NS	0,104	-2,59	S-	-1,169	1,27	NS	0,174

NS = Tendência não significativa; S+ = Tendência significativa positiva a 5%; S- = Tendência significativa negativa a 5%.

Cavalcante et al. (2009), Lima et al. (2010) e Alencar et al. (2014) enfatizam que as tendências observadas nas variáveis meteorológicas pelo Brasil, em geral, podem ser atribuídas às mudanças climáticas, assim como à origem e à qualidade dos dados em estações meteorológicas, períodos de tempo analisados ou efeitos locais.

5.6.6 Análise anual da Evapotranspiração de Referência

Para melhor compreensão e discussão espaço temporal de tendência na ETo da região de estudo, foram construídos gráficos e tabelas contendo a média anual, reta de regressão linear estimada pelo estimador de Thiel-Sen, a fim de se evidenciar tendência linear com o passar do tempo, bem como sua magnitude, sinal (positiva ou negativa) e significância estatística (estatística Z).

Pela análise de regressão e pelo valor da estatística do teste de Mann-Kendall ($Z = -0,049$), observa-se, no (Figura 18a), que não há tendência significativa de aumento/declínio da ET_o anual, para o período de 1996 a 2016, no município de São Gonçalo, tendo em vista que o valor da estatística Z está dentro do intervalo $-1,96 < Z < 1,96$ com um nível de significância de 0,05 que não rejeita a hipótese nula (H_0) de que há tendência na série. Como o p -valor calculado é maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$, não se deve rejeitar a hipótese nula (H_0) em favor da hipótese alternativa (H_a) de que há uma tendência na série. Estatisticamente, o risco de rejeitar a hipótese nula H_0 quando verdadeira é de 68,80%. A inclinação da reta pelo método de Sen foi de 0,013 com um intervalo de confiança de 0,05. Pode-se destacar que a referida localidade apresenta um baixo valor de desvio padrão ($D.P = 0,37$), apresentando uma baixa variação de um ano pra outro.

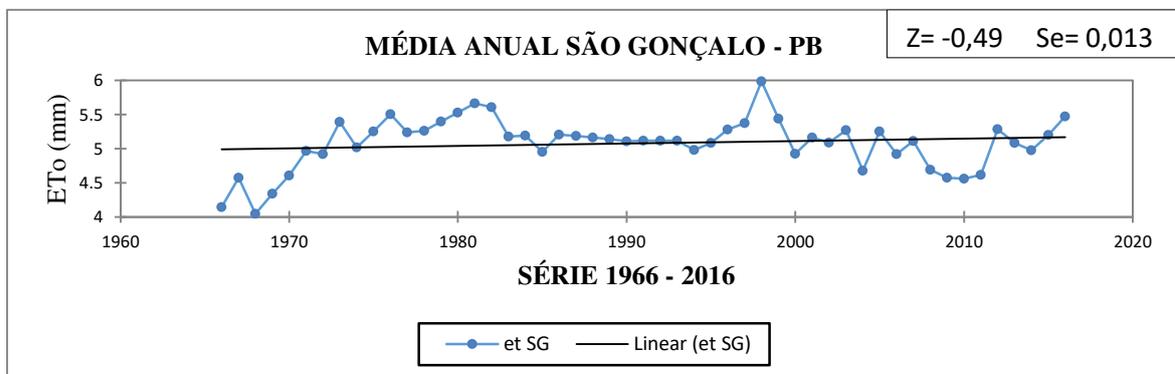
Seguindo o mesmo raciocínio, pode-se observar, na (Figura 18b), que não há tendência significativa de aumento ou declínio da ET_o anual, para o período de 1975 a 2016, no município de Patos, com ($Z = -1,95$). A inclinação da reta pelo método de Sen foi de -0,198 com um intervalo de confiança de 0,05. Pode-se destacar que a referida localidade apresenta um baixo valor de desvio padrão ($D.P = 0,33$), e que na (Figura 18e), no período de 1993 a 2016, no município de Areia, com ($Z = -0,288$). A inclinação da reta pelo método de Sen foi de -0,028, com um intervalo de confiança de 0,05. Pode-se destacar que a referida localidade apresenta um baixo valor de desvio padrão ($D.P = 0,19$).

Observa-se que, na (Figura 18c), que o município de Monteiro apresenta um valor de $Z = 2,45$, apresentando-se tendência significativa de aumento da ET_o anual, de 0,3 (mm década^{-1}), para o período de 1966 a 1970 (linha pontilhada laranja). Tomando-se mais significativa a partir do ano de 1980 (linha pontilhada verde) com 0,7 (mm década^{-1}). Pode-se observar que, após 1980, a tendência da ET_o persistiu com sinal positivo, porém com maior inclinação que no ano de 1970. O desvio padrão para todo o período foi de ($D.P = 0,48$), apresentando uma inclinação (magnitude) de tendência pelo método de Sen de 0,15 (mm década^{-1}) em todo o período de estudo. Já na (Figura 19d), o município de Campina Grande apresenta valor de $Z = 2,84$, caracterizando uma tendência de aumento da ET_o de 0,3 (mm década^{-1}) para o período de 1966 a 1970 (linha pontilhada laranja), a qual se tornou

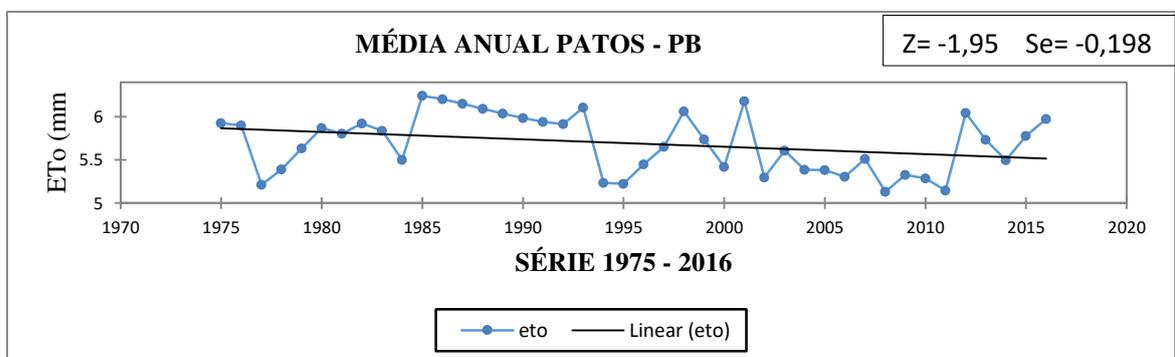
mais significativa, a partir do ano de 1980, (linha pontilhada verde) de $0,7$ (mm década^{-1}). Verifica-se que, em geral, as tendências apresentam configurações similares, diferindo apenas na inclinação (magnitude) de tendência que é de $0,23$ (mm década^{-1}) na (Figura 19d). Com relação especificamente a (Figura 19e), não houve tendência significativa, pois o valor é menor que o limite apresentado para o alfa igual a $0,05$.

Quando se analisa a (Figura 20f), o município de João Pessoa apresenta valor de $Z= 3,23$ superior ao observado nas (Figuras 18c e 19d), visto que segue uma tendência de aumento de $0,13$ (mm década^{-1}) no período de 1966 a 1970 e se intensifica no período de 1980 a 2016 com $0,16$ (mm década^{-1}). Apresenta um desvio padrão ($D.P= 0,11$) e uma inclinação (magnitude) de tendência de $0,51$ (mm década^{-1}) em todo período de estudo, caracterizando uma tendência mais significativa que em outros municípios anteriormente citados.

a)



b)



c)

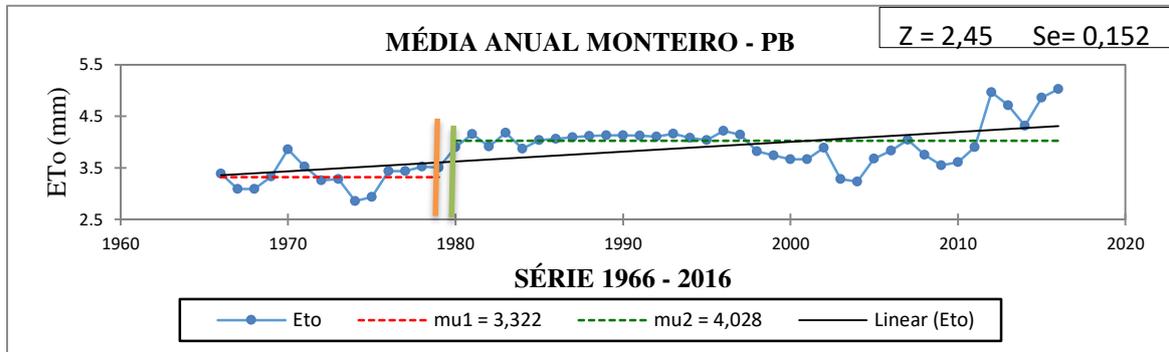
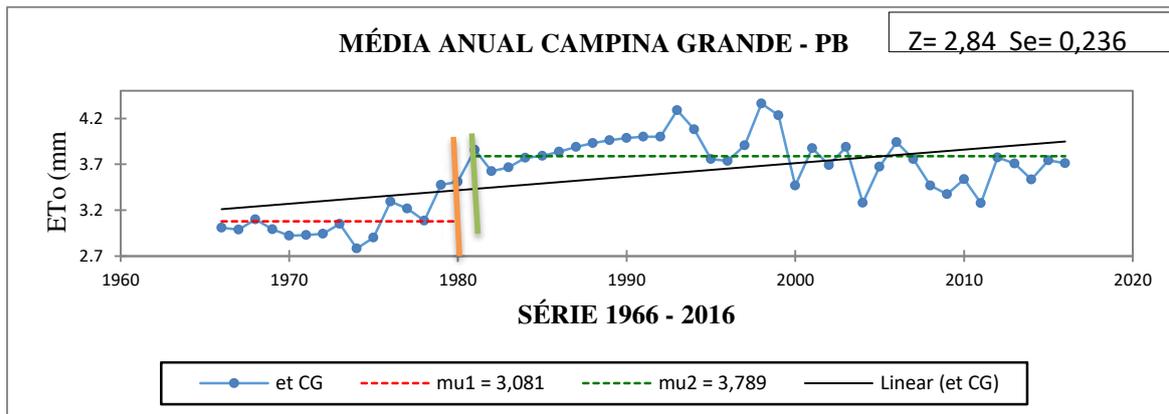
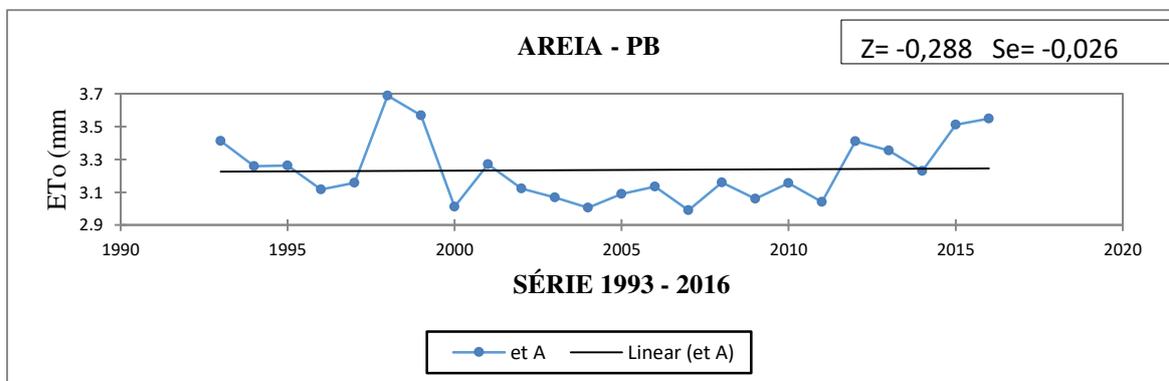


Figura 18 - Séries temporais de ET_0 com as médias anuais no período de 1966 a 2016, linear (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha laranja e azul) para as localidades de São Gonçalo, Patos e Monteiro para o período de 1966 a 2016, com exceção de Patos que vai de 1975 a 2016.

d)



e)



f)

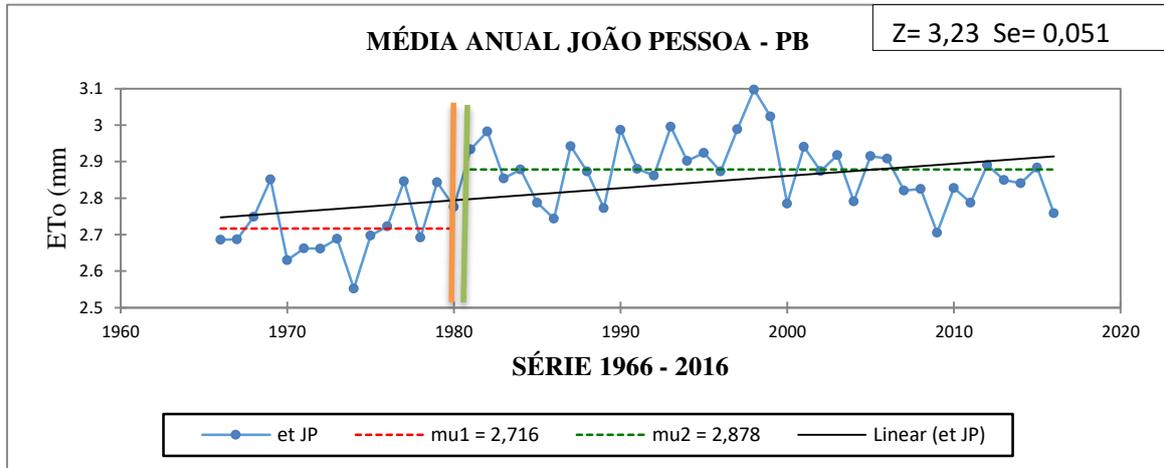


Figura 19 - Séries temporais de ET_o com as médias anuais no período do verão (linha preta) com seus testes de Mann-Kendall (Z), magnitude (Se) e o ponto de mudança (linha azul) para as localidades de Campina Grande, Areia e João Pessoa para o período de 1966 a 2016, com exceção de Areia que vai de 1993 a 2016.

Verifica-se na Tabela 13 que, quando aplicado o teste de tendência para o ET_o na região de estudo, a estatística Z demonstrou sempre valores maiores que zero na escala anual, nos municípios onde se identifica tendência, confirmando uma tendência de aumento. O estimador de Sen da ET_o , considerando duas casas decimais, revelou valores variando entre 0,50 a 0,23 (mm década^{-1}). Com base nesses resultados, pode-se concluir que, com exceção dos municípios que não apresentaram tendência, as séries anuais de ET_o na região de estudo mostraram-se tendência temporal de aumento em seus valores.

É importante ressaltar, não somente a comparação de valores da ET_o do dia-a-dia, mas as respectivas oscilações (aumento ou declínio) da média com o desvio padrão, estudo esse adotado por Cabral Júnior e Almeida (2013) e Almeida (2013), ao analisar se as oscilações temporal e espacial das temperaturas do ar, indicam variabilidade natural ou mudança climática. Silva (2004) verificou para o Nordeste do Brasil, uma tendência estatisticamente significativa de aumento da ET em 8 estações.

Não obstante, Pereira et al. (2012) relataram que a mesorregião do Sertão Paraibano apresenta uma maior taxa de água evapotranspirada, quando comparada às outras regiões. E sustentam que as mesorregiões do Sertão, Borborema e Agreste possuem um baixo índice de precipitação, quando comparada à alta

evapotranspiração anual ocorrida, sendo o maior volume pluviométrico advindo da região Litoral do Estado.

Tabela 13 - Teste estatístico de Mann-Kendall (Z) e do estimador de Sen (magnitude) aplicados às séries temporais média anuais da ET_o para João pessoa, Areia, Campina Grande, Monteiro, patos e São Gonçalo, considerando nível de 5% de significância (p-valor <0,05) para o período de 1966 a 2016, excerto Areia que vai de 1993 a 2016 e Patos que vai de 1975 a 2016.

Var.	Série	SÃO GONÇALO			PATOS			MONTEIRO		
		Z _s	Tendência $\alpha=0,05$	Se	Z _s	Tendência $\alpha=0,05$	Se	Z _s	Tendência $\alpha=0,05$	Se
ET _o (mm)	Anual	-0,49	NS	0,013	-1,95	NS	-0,198	2,45	S+	0,152
Var.	Série	CAMPINA GRANDE			AREIA			JOÃO PESSOA		
		Z _s	Tendência $\alpha=0,05$	Se	Z _s	Tendência $\alpha=0,05$	Se	Z _s	Tendência $\alpha=0,05$	Se
ET _o (mm)	Anual	2,84	S+	0,023	-0,288	NS	-0,028	3,23	S+	0,051

NS = Tendência não significativa; S+ = Tendência significativa positiva a 5%; S- = Tendência significativa negativa a 5%.

5.3.7 Análise sazonal da Evapotranspiração de Referência

Para melhor compreensão e discussão espaço temporal de tendência na ET_o da região de estudo, foram construídos boxplot das estações do ano e tabelas com as médias diárias, contendo valores médio para cada estação do ano, mediana, valores máximo e mínimo da ET_o , o estimador de Thiel-Sen com sua magnitude (Se), destacando o seu sinal (aumento ou declínio) e a significância estatística (estatística Z) por meio do teste de Mann-Kendall com um nível de significância de 0,05 para evidenciar possíveis tendência nas estações do ano.

A Figura 20, evidencia a ET_o (mm dia tri^{-1}) por estação do ano, apresentando-se *boxplot* com os valores médio diário na escala sazonal de São Gonçalo (a), Patos (b), Monteiro (c), Campina Grande (d), Areia (e) e João Pessoa (f), a fim de identificar quais das estações do ano que podem conter tendência e que reflitam nos dados diário.

Pode-se observar que, no município de São Gonçalo (Figura 20a), as estações do ano apresentam oscilações em seus valores médio, sugerindo tendência no decorrer do período. Observou-se tendência de aumento ou declínio, estatisticamente significativa a um nível de 0,05, confirmada pelo teste de Mann-

Kendall com valor da estatística $Z = -3,64$ no Verão, o que configura uma tendência de declínio, e $Z = -2,64$ no Outono, com seus respectivos valores médio de 4,9 (mm dia/tri) e 4,2 (mm dia/tri). Já no Inverno se configurou uma tendência de aumento com $Z = 6,00$ e na Primavera com $Z = 6,11$, com seus respectivos valores médio de 4,7 (mm dia/tri) e 5,9 (mm dia/tri).

Para o município de Patos (Figura 20b), verificou-se uma tendência de declínio nas estações de Verão, com $Z = -7,37$, Outono, com $Z = -10,24$, e Inverno, com $Z = -10,74$, cujas as respectivas médias são 5,6 (mm dia/tri) para o Verão, 4,9 (mm dia/tri) para Outono e 5,2 (mm dia/tri) para o Inverno. Na Primavera, observa-se uma tendência de aumento com $Z = 4,17$ e média de 6,9 (mm dia/tri). A partir disso, nota-se que a menor média entre as estações do ano encontra-se no Outono e a maior na Primavera. A máxima ETo assinalada para os meses da primavera está associada ao maior aquecimento radioativo. Os meses do outono, ao contrário, apresentaram os menores valores de ETo em virtude da menor forçante evaporativa, ou seja, o aquecimento por radiação solar.

Com relação aos municípios de Monteiro (Figura 20c) e Campina Grande (Figura 9 - d), foi possível observar uma tendência de aumento em todas as estações do ano, como mostra os valores da estatística Z do teste de Mann-Kendall, destacado na Tabela 14, cujas as respectivas médias, para o município de Monteiro (Figura 20c), foram 4,0 (mm dia/tri) para o Verão, 3,0 (mm dia/tri) para outono, 3,5 (mm dia/tri) para o Inverno e 4,7 (mm dia/tri) para a primavera. No município de Campina Grande (Figura 20d), a média foi de 3,9 (mm dia/tri) para o Verão, 2,9 (mm dia/tri) para outono, 3,0 (mm dia/tri) para o Inverno e 4,3 (mm dia/tri) para a primavera. Nota-se claramente que na primavera se encontram os maiores valores da ETo. Também se pode notar uma tendência de aumento da ETo no município de João Pessoa (Figura 20f), com média 3,1 (mm dia/tri) no Verão, 2,4 (mm dia/tri) no Inverno e 3,3 (mm dia/tri) e na Primavera. No outono não houve tendência significativa, considerando que o $Z = 1,78$ está dentro do intervalo $(-1,96 < Z < 1,96)$ calculado para um nível de significância de 0,05.

O município de Areia foi o único em que não se detectou tendência significativa na escala sazonal (Figura 20e), pois apresentou valores de Z compreendidos no intervalo citado acima. A estação do Verão apresentou média de

3,5 (mm dia/tri), 2,6 (mm dia/tri) no Outono, 2,7 (mm dia/tri) no Inverno, e uma leve tendência de aumento na Primavera, com $Z = 3,8$ e média de 3,9 (mm dia/tri).

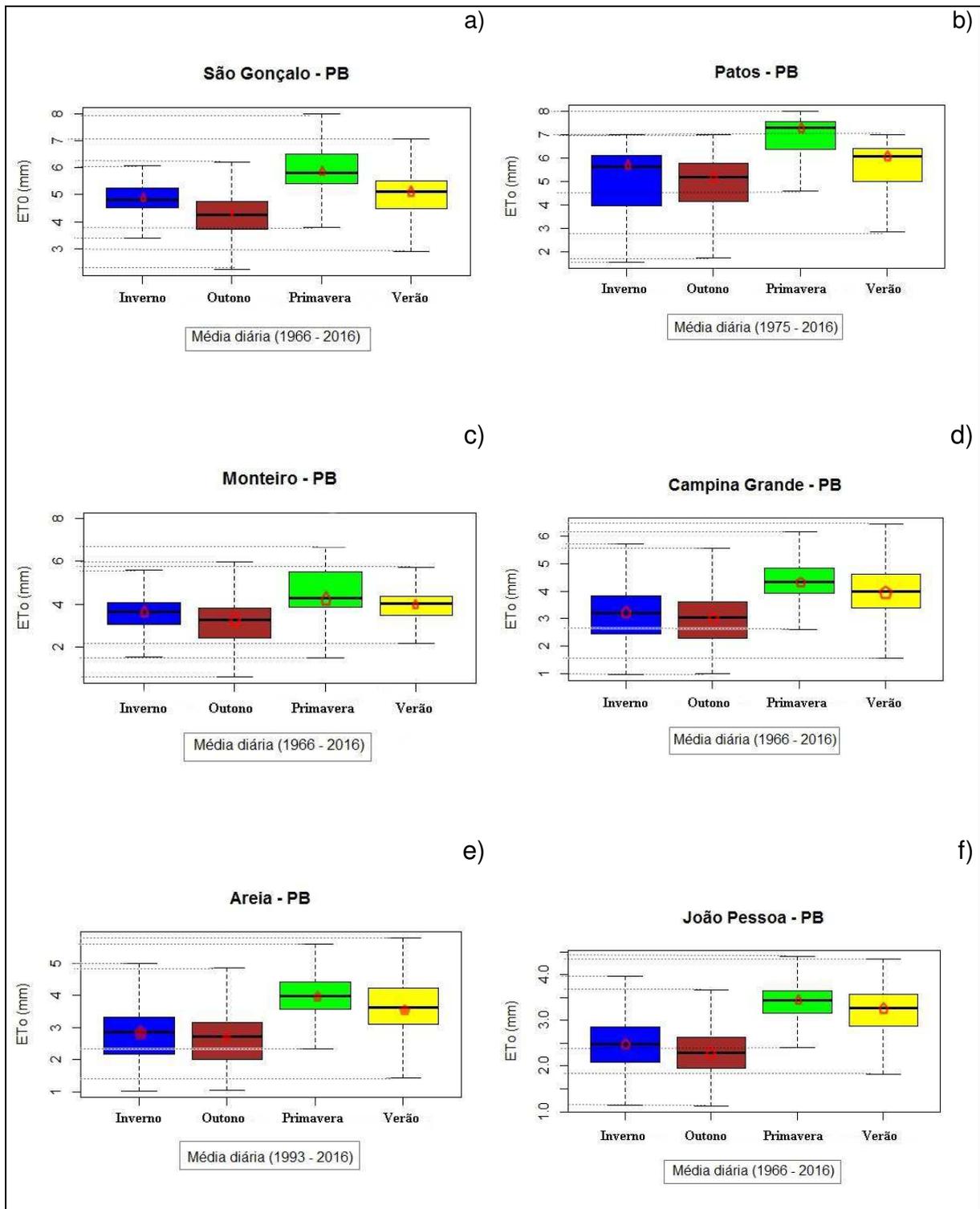


Figura 20 - Boxplot sazonal da ET_0 média diária (mm/dia) para as localidades de São Gonçalo, Patos, Monteiro, Campina Grande, Areia e João Pessoa para o período de 1966 a 2016, com exceção de Areia que vai de (1993 a 2016) e Patos que vai de (1975 a 2016).

Pelo exposto, nota-se que os valores médio diário da ETo para a localidade de Patos (Figura 20b) são maiores quando comparados às demais localidades durante todo o ciclo sazonal; e que João Pessoa apresentou os menores valores, como se pode observar na (Figura 20f). Percebe-se, então, que, de modo geral, a ETo na região de estudo apresenta baixa dispersão dos dados com relação à média, o que indica uma boa aproximação da mediana, como pode ser observado por meio dos gráficos boxplot da Figura 20.

A Tabela 14 mostra que, quando aplicado o teste de tendência para ETo nas localidades de estudo, a estatística Z demonstrou valores positivos na escala sazonal, confirmando a tendência de aumento nas localidades de Monteiro, Campina Grande e João Pessoa em todas as estações do ano, enquanto a localidade de São Gonçalo apresentou tendência de declínio no Verão e outono. O município de Patos apresentou tendências de declínio no verão, no outono e no inverno. Areia, por sua vez, apresentou tendência de declínio no outono e inverno.

De maneira similar Silva (2004) verificou, para o Nordeste do Brasil, uma tendência estatisticamente significativa de aumento de ET em 8 localidades.

Tabela 14 - Teste estatístico de Mann-Kendall (Z) e do estimador de Sen (magnitude) aplicados às séries temporais sazonais da ET_o para João pessoa, Areia, Campina Grande, Monteiro, patos e São Gonçalo, considerando nível de 5% de significância (p-valor <0,05) para o período de 1966 a 2016, excerto Areia que vai de 1993 a 2016 e Patos que vai de 1975 a 2016.

Var.	Série	JOÃO PESSOA			AREIA			CAMPINA GRANDE		
		Z _s	Tendência $\alpha=0,05$	Se	Z _s	Tendência $\alpha=0,05$	Se	Z _s	Tendência $\alpha=0,05$	Se
ET _o (mm)	Verão	11,2	S+	0,001	1,24	NS	0,000	22,7	S+	0,003
	Outono	1,78	NS	0,00	-1,49	NS	-0,001	13,8	S+	0,002
	Inverno	8,29	S+	0,001	-1,74	NS	-0,001	12,4	S+	0,002
	Primavera	12,8	S+	0,001	3,83	S+	0,001	29,8	S+	0,003
Var.	Série	MONTEIRO			PATOS			SÃO GONÇALO		
		Z _s	Tendência $\alpha=0,05$	Se	Z _s	Tendência $\alpha=0,05$	Se	Z _s	Tendência $\alpha=0,05$	Se
ET _o (mm)	Verão	23,6	S+	0,003	-7,37	S-	-0,001	-3,64	S-	0,00
	Outono	12,9	S+	0,002	-10,2	S-	-0,002	-2,64	S-	0,00
	Inverno	15,0	S+	0,002	-10,7	S-	-0,002	6,00	S+	0,001
	Primavera	26,4	S+	0,004	4,17	S+	0,000	6,11	S+	0,001

NS = Tendência não significativa; S+ = Tendência significativa positiva a 5%; S- = Tendência significativa negativa a 5%.

A Tabela 15 apresenta os valores médios para a taxa diária de evapotranspiração de referência, considerando o período 1966 - 2016 e os respectivos desvios padrão, encontrados nas diferentes escalas temporais e localidades escolhidas para este estudo. As médias, em todo o período analisado, variaram entre $2,8 \text{ mm dia}^{-1}$, em João Pessoa, $5,6 \text{ mm dia}^{-1}$, em Monteiro e $5,0 \text{ mm dia}^{-1}$, em São Gonçalo. A menor taxa de evapotranspiração de referência encontrada foi de $2,3 \text{ mm dia}^{-1}$ e $2,4 \text{ mm dia}^{-1}$, para os outonos e invernos em João Pessoa, enquanto a maior taxa obtida foi de $6,9 \text{ mm dia}^{-1}$, nas primaveras de Patos.

Tabela 15 - Valores médios da ET_o entre 1966 e 2016, excerto Patos que vai de 1975 a 2016 e Areia que vai de 1993 a 2016 por localidade e escala temporal.

Valores médios da ET_o e desvios padrão (mm/dia)					
Localidade	Anual	Verão	Outono	Inverno	Primavera
João Pessoa	$2,8 \pm 0,11$	$3,1 \pm 0,53$	$2,3 \pm 0,50$	$2,4 \pm 0,54$	$3,3 \pm 0,39$
Areia	$3,2 \pm 0,19$	$3,5 \pm 0,83$	$2,6 \pm 0,80$	$2,7 \pm 0,81$	$3,9 \pm 0,67$
Campina Grande	$3,5 \pm 0,40$	$3,9 \pm 0,93$	$2,9 \pm 0,89$	$3,0 \pm 0,91$	$4,3 \pm 0,77$
Monteiro	$3,8 \pm 0,48$	$4,0 \pm 1,06$	$3,0 \pm 0,95$	$3,5 \pm 0,99$	$4,6 \pm 1,11$
Patos	$5,6 \pm 0,33$	$5,6 \pm 1,11$	$4,9 \pm 1,09$	$5,2 \pm 1,07$	$6,9 \pm 0,82$
São Gonçalo	$5,0 \pm 0,37$	$4,9 \pm 0,96$	$4,2 \pm 0,73$	$4,7 \pm 0,69$	$5,8 \pm 0,94$

6 CONCLUSÕES

A evolução temporal da evapotranspiração de referência para as localidades de Monteiro, Campina Grande e João Pessoa, para o período compreendido entre os anos de 1966 a 2016, mostrou tendência de aumento estatisticamente significativa de $0,3 \text{ mm década}^{-1}$, para o período que se estende de 1966 a 1970, e $0,7 \text{ mm década}^{-1}$, para o período após 1980. O mesmo ocorre em Campina Grande. Já em João Pessoa houve aumento de $0,13 \text{ mm década}^{-1}$, para o período compreendido entre 1966 a 1970, ficando mais significativa a partir do ano de 1980 com $0,16 \text{ mm década}^{-1}$.

Na escala sazonal, São Gonçalo apresentou tendência estatisticamente significativa de aumento no inverno e na primavera, com seus respectivos valores médios de $4,7 \text{ (mm dia/tri)}$ e $5,9 \text{ (mm dia/tri)}$; em Patos observou-se uma tendência de declínio nas estações de verão, outono e inverno, com suas respectivas médias de $5,6 \text{ (mm dia/tri)}$ para o Verão, $4,9 \text{ (mm dia/tri)}$ para Outono e $5,2 \text{ (mm dia/tri)}$ para o Inverno.

Com relação aos municípios de Monteiro e Campina Grande, foi possível observar uma tendência de aumento em todas as estações do ano. As médias para o município de Monteiro foram $4,0 \text{ (mm dia/tri)}$ para o Verão, $3,0 \text{ (mm dia/tri)}$ para outono, $3,5 \text{ (mm dia/tri)}$ para o Inverno e $4,7 \text{ (mm dia/tri)}$ para a primavera; no município de Campina Grande, as médias foram $3,9 \text{ (mm dia/tri)}$ para o Verão, $2,9 \text{ (mm dia/tri)}$ para outono, $3,0 \text{ (mm dia/tri)}$ para o Inverno e $4,3 \text{ (mm dia/tri)}$ para a primavera. Nota-se claramente que, na primavera, se encontram os maiores valores da ETo. Também fica evidente uma tendência de aumento da ETo no município de João Pessoa que, no verão, registrou média de $3,1 \text{ (mm dia/tri)}$, no inverno $2,4 \text{ (mm dia/tri)}$ e na primavera $3,3 \text{ (mm dia/tri)}$. Já no município de Areia não foi detectada tendência significativa na escala sazonal.

As séries de dados de temperatura máxima e mínima, insolação, umidade relativa e velocidade do vento a 2 metros de altura apresentaram tendência de aumento. No município de Patos houve uma tendência de aumento a partir do ano 1997 de $0,9 \text{ }^\circ\text{C década}^{-1}$; em Monteiro, a partir de 1988, de $0,5 \text{ }^\circ\text{C década}^{-1}$; em Campina Grande, a partir do ano de 1987, de $0,9 \text{ }^\circ\text{C década}^{-1}$; e em João Pessoa, a partir do ano de 1993, de $0,7 \text{ }^\circ\text{C década}^{-1}$, muito maior do que o valor de aumento

anual da temperatura média da atmosfera terrestre entre 1880 e 2012, que foi de apenas $0,006\text{ }^{\circ}\text{C ano}^{-1}$, segundo o IPCC (2014).

Com relação à escala sazonal, pode-se destacar que houve tendência significativamente de aumento em todas as estações do ano, em todos os lugares, exceto em Areia (em que não houve tendência significativa no verão). Contudo o outono e inverno apresentaram tendência de declínio e a primavera uma leve tendência de aumento.

Para os valores médios anuais de temperatura mínima diária do ar, as localidades que apresentaram tendência estatisticamente significantes foram Monteiro, Campina Grande e João Pessoa. As taxas de crescimento encontradas para as temperaturas mínima situaram-se entre, $0,47\text{ }^{\circ}\text{C}$ em Monteiro e $0,50\text{ }^{\circ}\text{C ano}^{-1}$ em João Pessoa, ficando a média em $0,48\text{ }^{\circ}\text{C ano}^{-1}$. Já em Campina Grande foi de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C década}^{-1}$ a partir de 1988. Na escala sazonal, pode-se destacar que houve tendência significativa de aumento em São Gonçalo, no outono e na primavera, e em Monteiro, em todas as estações do ano. Em Patos houve uma tendência de declínio no verão, inverno e primavera. Em Campina Grande houve uma tendência de aumento em todas as estações do ano, assim como em João Pessoa. Em contrapartida, em Areia houve tendência de aumento no verão, no outono e na primavera.

Para os valores médios anuais de insolação (n), as localidades que apresentaram tendências estatisticamente significantes foram Patos e Campina Grande, sendo detectada um aumento. As taxas de aumento encontradas para Patos tornaram-se significativa a partir de 1993 com um aumento de 0,3 horas por década; já em Campina Grande a tendência de aumento começou a partir de 1983 com um crescimento de 0,7 horas por década. Na escala sazonal, pode-se observar que, na localidade de São Gonçalo, houve tendência de aumento de 0,1 horas década⁻¹ no inverno e na primavera, enquanto em Patos, Monteiro e Campina Grande houve um aumento de 0,1 horas década⁻¹ em todas as estações do ano. No município de Areia, constatou-se tendência de aumento de 0,2 horas década⁻¹ no verão e 0,1 horas década⁻¹ no inverno e primavera. Também se identificou uma leve tendência de declínio no outono, na localidade de João Pessoa; apenas no outono e na primavera houve uma leve tendência de declínio.

Observou-se que a única localidade que apresentou tendência estatisticamente significativa de umidade relativa (UR) na escala anual foi Campina Grande, apresentando tendência de declínio médio de -2,0 % por década. Essa mudança começou a ocorrer a partir do ano de 1979. Na escala sazonal, pode-se observar que, na localidade de São Gonçalo, constatou-se tendência de aumento de 0,2% por década em todas as estações do ano, enquanto em Patos houve uma elevação de 0,1 % por década nas estações de verão, outono e inverno. Já em Monteiro, constatou-se tendência de declínio de -0,1 % por década no verão e na primavera, porém no outono observa-se uma leve elevação de 0,1% por década. A localidade de Campina Grande apresenta um declínio de -0,1 % por década em todas as estações do ano, o mesmo pode-se observar em Areia no verão e na primavera, só que com um declínio de -0,2% por década, diferentemente do outono e inverno que apresentaram uma elevação de 0,2% por década, enquanto João Pessoa apresentou declínio de -0,1% por década no verão e -0,2% por década no inverno e na primavera.

Para a velocidade do vento a dois metros de altura, as localidades que apresentaram tendência estatisticamente significativa na escala anual foram Patos e Monteiro, com a taxa de declínio variando entre $-0,37 m s^{-1} década^{-1}$, a partir de 1989, em Patos, e uma elevação de $1,1 m s^{-1} década^{-1}$, a partir do ano de 1981, em Monteiro. Na escala sazonal, pode-se observar que a localidade de São Gonçalo, Patos e Areia apresentaram tendência de declínio em todas as estações do ano, variando entre de $-0,1 m s^{-1} década^{-1}$, em São Gonçalo e Patos, respectivamente, e $-0,2 m s^{-1} década^{-1}$ em Areia. Diferentemente, pode-se observar, na localidade de Monteiro e João Pessoa, elevação variando entre $0,1 m s^{-1} década^{-1}$ e $0,2 m s^{-1} década^{-1}$ em todas as estações do ano. Observa-se o mesmo em Campina Grande no verão e outono, com taxa de aumento de $0,1 m s^{-1} década^{-1}$, porém na primavera apresentou um leve declínio de $-0,1 m s^{-1} década^{-1}$. A diversidade de tendências encontradas para as diversas variáveis contribui para o entendimento das mudanças climáticas como tendo um forte aspecto regional, portanto, os resultados obtidos não devem ser tomados como válidos para outras regiões – ainda que sejam climaticamente semelhantes.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, H.C; WANDERLEY, H. S.; ALMEIDA, T. S.; DELGADO, R. C; VIEIRA, G. H. S. Evolução temporal da evapotranspiração de referência e sua sensibilidade das principais elementos climáticos na cidade de Uberaba – MG. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. V.7, n.1, p.x-xx, jan-mar., 2012.

ALENCAR, L. P.; et al. Variação temporal dos elementos climáticos e da ETo em Catalão, Goiás, no período de 1961-201. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.8, p.190, 2014.

ALEXANDRE, G. R. Estudo para identificação de tendências do regime pluvial na região metropolitana de belo horizonte a partir de métodos estatísticos e modelos climáticos, p. 215, 2009.

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper 56**. Roma: FAO, v.300, n. 9, 1998.

ALLEN, R. G.; JENSEN. M. E.; WRIGHT, J. L. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v.81, p.650-662, 1989.

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D.; SMITH, M. – **Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy, p.297-301, 1998.

ALLEN, R. G. Quality assessment of weather data and micrometeorological flux impacts on evapotranspiration calculation. **Journal of Agricultural Meteorology**, v.64, n.4, p.191-204, 2008.

ALMEIDA, H. A. Oscilações decadal e sazonal das temperaturas no semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.6, p.1100-1114, 2013.

ALMEIDA, H. A. ; CABRAL JUNIOR, J. B.. Variabilidades sazonais e interdecadais da chuva nas microrregiões geográficas do estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.7, p.42-57, 2014.

Atlas Escolar da Paraíba/Coordenadora: Janete Lins Rodrigues – João Pessoa: GRAFSET, @. 2002. 3ª edição.

AMBRIZZI, T. et al. Cenários regionalizados de clima no Brasil para o século XXI: Projeções de clima usando três modelos regionais. Relatório 3. Ministério do Meio ambiente – MMA, secretaria de Biodiversidade e Florestas – SBF, Diretoria de Conservação da Biodiversidade – BCBio, 2007.

ASSIS, J. M. O. **Análise de tendências de mudanças climáticas no semiárido de Pernambuco**. 2012. 116 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

BAGUIS, P. et al. Climate change scenarios for precipitation and potential evapotranspiration over central Belgium. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 99, n. 3-4, p. 273-286, 2010.

BLACKIE, J. R.; SIMPSON, T. K. M. Climatic variability within the Balquhider catchments and its effect on Penman potential evaporation. **Journal of Hydrology**, v. 145, n. 3, p.371-387, 1993.

BRUTSAERT, W.; PARLANGE, M. B. **Hydrologic cycle explains the evaporation paradox**. *Nature*, v.396, n.6706, p.30-30, 1998.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C.; Evapotranspiração de Referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Trop.**, Goiânia, v.41, p.456-465, 2011.

CAVALCANTE, I. F. A.; et al. **Tempo e Clima no Brasil**, São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CHAOUCHE, K. et al. Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change. **Comptes Rendus Geoscience**, v.342, n.3, p.234-243, 2010.

CHATTOPADHYAY, N.; HULME, M. **Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change**. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.87, n.1, p.55-73, 1997.

CHEN, D. et al. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. **Climate Research**, v.28, n.2, p.123-132, 2005.

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, 2014.

COLLISCHONN, W. **Evapotranspiração**. UFRGS, Porto Alegre, Apostila 5, Hidrologia, p.11, 2007.

CONJUNTURA DOS RECURSOS HÍDRICOS: INFORME 2014. Brasília: ANA, 2015. 107p. Disponível em <http://conjuntura.ana.gov.br/docs/conj2014_inf.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2017.

COSTA, R. L. et al. Imputação Multivariada de dados diários de precipitação e Análise de índices de extremos climáticos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.3, p: 661- 675, 2012.

DEO. et al. **On Australian heat waves: Time series analysis of extreme temperature events in Australia, 1950-2005**. In MODSIM 2007 International Congress on Modeling and Simulation. Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand, p.626-635, 2007.

DOLMAN, A. J. A note on a really-averaged evaporation and the value of the effective surface conductance. **Journal of Hydrology**, v.138, n.3, p.583-589, 1992.

DORENBOS, J. & PRUITT, W. O., Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd ed, Rome, 179pp. 1977. ESPADAFOR, M. et al. An analysis of the tendency of reference evapotranspiration estimates and other climate variables during the last 45 years in Southern Spain. *Agricultural Water Management*, v.98, n.6, p.1045-1061, 2011.

DOUGLAS, E. M.; VOGEL, R. M.; KROLL, C. N. Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. **Journal of Hydrology**, v.240, n.1, p.90 - 105, 2000.

EEA REPORT N. 3/2014: Public participation: contributing to better water management: Experiences from eight case studies across Europe. Luxembourg: **Publications Office of the European Union**, 2014.

EEA TECHNICAL REPORT N. 7/2011: Safe water and healthy water services in a changing environment. Luxembourg: **Publications Office of the European Union**, 2011.

FAN, M.; SHIBATA, H. Simulation of watershed hydrology and stream water quality under land use and climate change scenarios in Teshio River watershed, northern Japan. **Ecological Indicators**, v.50, p.79-89, 2015.

FANTE, K. P.; SANT'ANNA NETO, J. L. Aplicação de técnicas geoestatísticas em análises climatológicas: metodologias para preenchimento de falhas. In: **XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA**, 2013. Vitória/ES. Anais online. p.782-790, 2013. Disponível em: <<http://www.xvsbgfa2013.com.br/anais/trabalhos/Eixo02.pdf#page=782>>. Acesso em: 10/05/2016.

FERNANDES, A. L. T.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; TAKAY, B. Y. Avaliação do método Penman-Piche para a estimativa da evapotranspiração de referência em Uberaba-MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.3, p. 270-276, 2011.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. **Global and Planetary Change**, v.100, p.172-182, 2013.

GOLUBEV, V. S. et al. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment. **Geophysical Research Letters**, v.28, n.13, p. 2665-2668, 2001.

GONG, L. et al. Sensitivity of the Penman–Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. **Journal of Hydrology**, v.329, n.3, p.620-629, 2006.

GOVERNO DO ESTADO DE PARAÍBA. **Programa de ação estadual de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca no estado da Paraíba: PAE-PB/IICA**; SCIENTEC – João Pessoa: Secretaria de Estado dos Recursos Hídricos, do Meio Ambiente e da Ciência e Tecnologia. Superintendência de Administração do Meio Ambiente, 2011. Disponível em:<http://www.paraiba.pb.gov.br/wp-content/uploads/2013/09/Livro_PAE_PB.pdf>. Acessado em 09\08\2017.

GRUNDSTEIN, Andrew. Evaluation of climate change over the continental United States using a moisture index. **Climatic Change**, v.93, n.1-2, p.103-115, 2009.

HELSEL, D. R.; HIRSCH, R. M. Statistical methods in water resources. Reston: Elsevier, 1992. 548p. HOBBS, M. T.; RAMÍREZ, J. A.; BROWN, T. C. Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous US: Paradoxical or complementary? **Geophysical Research Letters**, v.31, n.13, 2004.

HUO, Z. et al. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China. **Journal of Hydrology**, v. 492, p. 24-34, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Atlas Nacional do Brasil Milton Santos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. 2015. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/inicio.php>. Acesso em: 23 dez. 2016.

IPCC. Climate Change 2001: **Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001

IRMAK, S. et al. Trend and magnitude of changes in climate variables and reference evapotranspiration over 116-yr period in the Platte River Basin, central Nebraska–USA. **Journal of Hydrology**, v.420, p.228-244, 2012.

JUNGER, W. e LEON, A. P. mtsdi: **Multivariate time series data imputation**. R package version 0.3.3. <http://CRAN.R-project.org/package=mtsdi>, 2012.

JUNGER, W. L., **Análise, imputação de dados e interfaces computacionais em estudos de séries temporais epidemiológicas**. 178. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Saúde coletiva, UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. London: Charles Griffin, 1975.

KHAN, S. et al. Can irrigation be sustainable?. **Agricultural Water Management**, v. 80, n.1, p.87-99, 2006.

LACERDA, F. F. et al. Um Estudo de Detecção de Mudanças Climáticas no Semiárido de Pernambuco. In: **SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA**, 3, 2009. Canela-RS.

LAWRIMORE, J. H.; PETERSON, T. C. Pan evaporation trends in dry and humid regions of the United States. **Journal of Hydrometeorology**, v.1, n.6, p.543-546, 2000.

LIMA, R. A. F.A.; MENEZES, H. E. A.; BRITO, J. I. B. de. Diagnóstico de tendência de mudanças na temperatura do ar no nordeste setentrional. **Revista Caatinga**, v.23, p.117-124, 2010.

LIU, B. et al. A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955–2000. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres** (1984–2012), v.109, n. D15, 2004.

LIU, C.; ZENG, Y. Changes of pan evaporation in the recent 40 years in the Yellow River Basin. **Water International**, v.29, n.4, p.510-516, 2004.

LONGOBARDI, A e VILLANI, P. Trend analysis of annual and seasonal rainfall time series in the Mediterranean area. **Internacional Journal of Climatology**, v.30, p. 1538-1546, 2010.

MANN, H. B. Non-parametric test against trend. *Econometrika*, **Princeton**, v.13, p. 245-259, 1945.

MCCARTHY, J. J.; CANZIANI, O. F.; LEARY, N. A.; DOKKEN, D. J.; WHITE, K. S. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. **Cambridge University Press**, 2001, 1032 pp.

MAKKINK, G. F. Ekzameno de la formula de Penman. *Neth. Journal Agricultural Science*, Amsterdam, v.5, n.1, p.290-305, 1957.

MARENGO, J. A. Condições climáticas e recurso hídricos no Norte do Brasil. In.: **Clima e Recursos Hídricos** 9. Porto Alegre, Brasil, 2003.

MARENGO, J. A. **Água e mudanças climáticas**. Estudos Avançados, São Paulo, v.22, n.63, p.83, 2008.

MAGRIN, G. et al. Latin america. In: PaRRY, M. L. et al. (ed.) **Climate Change 2007: impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working group ii to the Fourth Assessment report of the intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, uK: Cambridge university Press, P.581-615, 2007.

MARENGO ORSINI, J. a. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade - Caracterização do clima atual e defnição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI** (segunda edição). Brasília: Ministério do Meio ambiente, v.1. p.214, 2007.

MARTINEZ, M. D; et al. Communication response to the comments on time trends of daily Maximum and minimum temperatures in Catalinia (NW Spain) fr the period 1975-2014. **Internacional Journal of Climatology**, v.3, p.153-157, 2011.

MIDDELKOOP, H. et al. Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. **Climatic Change**, v.49, n.1-2, p.105-128, 2001.

MOONEN, A. C. et al. **Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years**. Agricultural and Forest Meteorology, v.111, n.1, p.13-27, 2002.

NOBRE, P. **Mudanças climáticas e desertificação: os desafios para o Estado Brasileiro**. Desertificação e Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro. Campina Grande, PB: Insa-PB. p.25-35, 2011.

NUNES, L. N.; KLUCK, M. M.; FACHEL, J. M. Comparação de métodos de imputação única e múltipla usando como exemplo um modelo de risco para mortalidade cirúrgica, **Revista Brasileira de Epidemiol**, v.13(4), p.596-606, 2010.

ONoz, B.; BAYAZIT, M. The power of statistical tests for trend detection. **Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences**, v.27, n.4, p.247-251, 2003.

PENMAN, H. L. EVAPORATION, TRANSPIRATION AND EVAPOTRANSPIRATION. IN: **VEGETATION AND HYDROLOGY. FARNHAM ROYAL: COMMONWEALTH AGRICULTURAL BUREAUX**, P.30-50, 1963.

PEREIRA, ANTONIO ROBERTO. **Evapotranspiração**. Antonio Roberto Pereira, Nilson Augusto Villa Nova, Gilberto Chohaku Sediayama. – Piracicaba: FEALQ, 1997.

PEREIRA, M. C. A.; MELO, D. F.; MELÓ, R. G. C.; SILVA, R. F. B.; FARIAS, S. A. R. Mesorregiões da Paraíba e suas necessidades de captação de água de chuva. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO E MANEJO DE ÁGUA DE CHUVA**, 8, 2012, Campina Grande. Anais... Campina Grande: FIEP, p. 01-06, 2012.

PERH-PB. **Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba**. Resumo Executivo e Atlas, 2006.

PETERSON, T. V. **Evaporation losing its strength**. Nature, v.377, p.687-688, 1995.

R Core Team. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0. URL <http://www.R-project.org/>, 2017.

RENAULT, D.; WAHAJ, R.; SMITS, S. **Multiple uses of water services in large irrigation systems**. FAO Irrigation and Drainage Paper 67. Roma: FAO, 2013.

RODERICK, M. L.; FARQUHAR, G. D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. **International Journal of Climatology**, v.24, n.9, p.1077-1090, 2004.

RODERICK, M. L.; FARQUHAR, G. D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. **Science**, v.298, n.5597, p.1410-1411, 2002.

RUBIN, D. B. **Multiple imputation after 18+ years**. JASA, 1989.

RUBIN, D. B. **Multiple imputation for Nonresponse in Surveys**. New York: Wiley; 1987.

RUSSO, David. A Geostatistical Approach to the Trickle Irrigation Design in a Heterogeneous Soil 1. **Water Resources Research**, v.19, n.3, p.632-642, 1983.

SANTOS, P. V.; SANTOS, R.; COUTINHO, M. D. L. Detecção de mudanças climáticas através de índices pluviométricos diários no estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.6, n.4, p.713-731, 2013.

SANTOS, S.; ASSIS, J. M. O.; SOUZA, W. M. Tendências de Mudanças Climáticas na Bacia do Rio Una, Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.7, n.2, p.243-257, 2014.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v.63, n.324, p.1379-1389, 1968.

SILVA, V. P. R. On climate variability in Northeast of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v.58, p.575-596, 2004.

SILVA, H. J. F.; LUCIO, P. S.; SILVA, C. M. S. E.; CABRAL JUNIOR, J. B.; SANTOS, M. S. **Comparação de métodos de estimativa da Evapotranspiração de Referência com dados de estação meteorológico automática para Rio Branco-AC**. In: V Simpósio Internacional de Climatologia, 2013, Florianópolis-SC. <http://www.sic2013.com/inexx/anais>. FLORIANÓPOLIS: SIC, 2013a.

SIROIS, A. A brief and biased overview of time series analysis or how to find that evasive trend. **WMO Report**, n.133, p.14-18, 1998.

SMITH, M., **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome FAO. 45p. 1991.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V. Índices de Detecção de Mudanças Climáticas Derivados da Precipitação Pluviométrica e das Temperaturas em Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.5, n.1, p.143-159, 2012.

TANG, B. et al. Impacts of climate variability on reference evapotranspiration over 58 years in the Haihe river basin of north China. **Agricultural Water Management**, v.98, n.10, p.1660-1670, 2011.

THOMAS, A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. **International Journal of Climatology**, v.20, n.4, p.381-396, 2000.

THOM, H. C. S. Some methods of climatological analysis. WMO Technical Note 1966. 53 p.

TORÍBIO, M. I. S. **Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración**. Cuadernos Técnicos de la SEG, n.3, p.36. Logroño: Geoforma Ediciones, 1992.

WALTER, I. A. et al. ASCE's Standardized Reference Evapotranspiration Equation. In: **PROCEEDINGS OF WATERSHED MANAGEMENT AND OPERATIONS MANAGEMENT 2000**, 2000, Fort Collins.

VICTORIA, R.; MARTINELLIL.; MORAES. J. ; BALLESTER, M. V.; KRUSHCHE, A.; PELLEGRINO, G. et al. Surface air temperature variations in the Amazon region and its border during this century. **Journal of Climate**, v.11, n.5, 1998.

XU, C. et al. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. **Journal of Hydrology**, v.327, n.1, p.81-93, 2006.

YUE, S. et al. **The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series**. Hydrological Processes, v.16, n.9, p.1807-1829, 2002.

YUE, S. e HASHINO, M. **Temperature trends in Japan: 1900-1996, Theoretical and Applied Climatology**, v.75, p.15-27, 2003.

ZHANG, Y. et al. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres** (1984–2012), v.112, n.12, 2007.

ZHOU, X. H.; et al. Multiple imputation in public health research. **Stat med**, 2001.