



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

TESE DE DOUTORADO

TENDÊNCIAS E VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL EM VARIÁVEIS
CLIMÁTICAS GLOBAIS UTILIZANDO REANÁLISES

HERIKA PEREIRA RODRIGUES

CAMPINA GRANDE – PB
DEZEMBRO – 2023

HERIKA PEREIRA RODRIGUES

TENDÊNCIAS E VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL EM VARIÁVEIS
CLIMÁTICAS GLOBAIS UTILIZANDO REANÁLISES

Área de Concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Doutora em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti

CAMPINA GRANDE – PB
DEZEMBRO – 2023

HERIKA PEREIRA RODRIGUES

TENDÊNCIAS E VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL EM VARIÁVEIS
CLIMÁTICAS GLOBAIS UTILIZANDO REANÁLISES

TESE APROVADA EM 11/12/2019

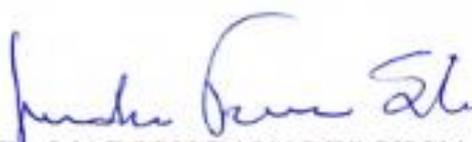
BANCA EXAMINADORA



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



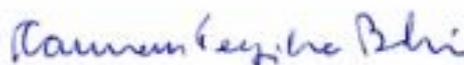
Profa. Dra. MAGALY DE FATIMA CORREIA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. VIRGINIA DE FATIMA BEZERRA NOGUEIRA
Ciências e Tecnologia Agroalimentar
Universidade Federal de Campina Grande



Dra. CARMEM TEREZINHA BECKER
Agência Executiva de Gestão das Águas
Estado da Paraíba

R696t

Rodrigues, Herika Pereira.

Tendências e variabilidade espaço-temporal em variáveis climáticas globais utilizando reanálises / Herika Pereira Rodrigues. – Campina Grande, 2023.

94 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti".

Referências.

1. Meteorologia de Meso e Grande Escalas. 2. Tendência Climática. 3. Reanálises. 4. ERA-Interim/European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). 5. National Center for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). 6. Temperatura e Água Precipitável. I. Cavalcanti, Carlos Enilson Palmeira. II. Título.

CDU 551.515.6(043)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, por sempre me amparar nos momentos difíceis,

A meus pais, Katia e Erivaldo,

por todo amor e carinho,

Por estarem sempre ao meu lado, por toda educação dada,

A Danilo Cabral, por todo amor e carinho, pelo incentivo e por não me deixar desistir,

A meu filho Antony Hellys,

por ser sempre minha razão de viver, meu maior motivo,

A meu avós, Dena Rodrigues e Arnaldo Cordeiro (in memória), por sempre estarem ao meu

lado, por todo amor e carinho em toda minha caminhada.

A meu orientador, Enilson Palmeira,

por todo aprendizado repassado, pela paciência na orientação e por não desistir desse trabalho

Aos professores da banca

pela solicitude em participar da examinação desse trabalho,

A todos os professores do departamento

pelo aprendizado e ao programa de pós graduação, pela oportunidade em realizar o curso,

A todos os meus amigos, em especial,

Fábio, Patrícia, Paula, Everson, Emmanuela, Fabiana, aos colegas de trabalho em geral, e

A todos que de alguma forma contribuíram para realização este trabalho.

Obrigada!

*A meus pais, meu esposo e meu filho, pelo incentivo,
por serem meu motivo maior em continuar e não desistir
nunca.*

Dedico.

*“Eu tentei noventa e nove vezes e falhei, mas na centésima tentativa eu consegui,
nunca desista de seus objetivos mesmo que esses pareçam impossíveis, a próxima tentativa
pode ser a vitória.”*

Albert Einstein, 1879-1955

RESUMO

Foram analisadas possíveis tendências climáticas das variáveis temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) a 2 metros ($^{\circ}\text{C}$), água precipitável (mm) e radiação de onda longa emitida pela superfície ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), a partir de informações das médias mensais obtidas das reanálises do National Center for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) e do ERA-Interim/ European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), para o Hemisfério Norte (HN), Hemisfério Sul (HS) e o Globo, no período de 1989 a 2018. Os dados foram analisados a partir de testes estatísticos de normalidade, sazonalidade, significância e tendência. Os resultados apontam para valores de tendência positiva com valores de temperatura do ar de 0,0290 e 0,0256 $^{\circ}\text{C}/\text{ano}$ para o HN; 0,0155 e 0,0088 $^{\circ}\text{C}/\text{ano}$ para o HS e 0,0229 e 0,0170 $^{\circ}\text{C}/\text{ano}$ para o Globo. A água precipitável apresentou tendência significativa de 0,0443 e 0,0364 mm/ano para o HN; 0,0259 e 0,0173 mm/ano para o HS e 0,0331 e 0,0284 mm/ano para o Globo. A radiação de onda longa emitida pela superfície para o NCEP apresenta tendência de 0,1396, 0,0593 e 0,1002 para HN, HS e globo. A espacialização das tendências com uso dos dados do NCEP e ECMWF apresenta núcleos com valores positivos e negativos, apontando tanto para aumento das variáveis analisadas quanto diminuição em algumas áreas. Os resultados estão de acordo com as análises feitas pelo IPCC para prognósticos futuros, e esse aumento pode estar associado a ações antrópicas, causando aumento da temperatura principalmente nas áreas em que observam-se derretimento das geleiras e aumento dos níveis oceânicos.

Palavras-chaves: reanálises, ERA-Interim/ECMWF, NCEP/NCAR, tendência climática, temperatura e água precipitável.

ABSTRACT

Possible climate trends were analyzed for the variables air temperature ($^{\circ}\text{C}$) at 2 meters precipitable water (mm) and longwave radiation emitted by the surface ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), based on information from the monthly averages obtained from the reanalysis of *National Center for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR) and *ERA-Interim/ European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), for the Northern Hemisphere (HN), Southern Hemisphere (HS) and the Globe, from 1989 to 2018. Data were analyzed using statistical tests of normality, seasonality, significance and trend. Results point to positive trend values with air temperature from 0,0290 and 0,0256 $^{\circ}\text{C}/\text{year}$, to HN; 0,0155 e 0,0088 $^{\circ}\text{C}/\text{year}$ to HS and 0,0229 and 0,0170 $^{\circ}\text{C}/\text{year}$ to Globe. The precipitable water showed a significant tendency of 0,0443 and 0,0364 mm/year to HN; 0,0259 and 0,0173 mm/year to HS and 0,0331 and 0,0284 mm/year to Globe. The surface-emitted longwave radiation to NCEP tends to 0,1396, 0,0593 and 0,1002 to HN, HS and globe. The NCEP and ECMWF spatialization presents nucleus with positive and negative values, pointing to both increase of analyzed variables and decrease in some areas. The results are consistent with IPCC analysis for future prognoses, and this increase may be associated with anthropogenic actions, causing temperature increases primarily in areas where glacier melting and rising ocean levels.

Palavras-chaves: reanalysis, ERA-Interim/ECMWF, NCEP/NCAR, climatics trends, temperature and ,precipitate water.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Área de estudo do globo terrestre (domínio compreendido de 90°S a 90°N e de -180° W a 180° E)	31
Figura 2:	Distribuição sazonal das médias mensais da temperatura média do ar (°C) a 2 metros para o HN (curva em vermelho), HS (curva verde) e para o Globo (curva azul)	37
Figura 3:	Distribuição sazonal das médias mensais de água precipitável (mm) para o HN (curva em vermelho), HS (curva verde) e Globo (curva azul) no período de janeiro de 1989 a dezembro de 2018.....	38
Figura 4:	Distribuição sazonal das médias mensais de radiação de onda longa emitida pela superfície ($W.m^{-2}$) para o HN, HS e Globo (1989-2018)	39
Figura 5:	Temperatura do ar (°C) a 2 metros: (a) para o Globo; (b) para o HN; (c) para o HS	41
Figura 6:	Temperatura do ar (°C) a 2 metros: (a) para o Globo; (b) para o HN ; (c) para o HS	44
Figura 7:	Variação interanual da Temperatura do ar (°C) a 2 metros: (a) para o Globo; (b) para o HN; (c) para o HS (teste de Pettitt)	45
Figura 8:	Variação sazonal da temperatura do ar (°C): (a) para o Globo; (b) para o HN e (c) para o HS. Comparação de duas décadas distintas: anos iniciais (de 1989 a 1999) e anos finais de (2008 a 2018)	47
Figura 9:	Água precipitável (mm): (a) para o Globo; (b) para o HN; (c) para o HS (médias mensais de 1989 a 2018).	49
Figura 10:	Tendência da água precipitável (mm): (a) para o Globo; (b) para o HN; (c) para o HS (de 1989 a 2018)	52
Figura 11:	Variação interanual da água precipitável (mm): (a) para o Globo; (b) para o HN; (c) para o HS (de 1989 a 2018 pelo método de Pettitt).	53
Figura 12:	Variação sazonal da água precipitável (mm): (a) para o Globo; (b) para o HN e (c) para o HS. Comparação de duas décadas distintas: anos iniciais (de 1989 a 1999) e anos finais de (2008 a 2018)	55
Figura 13:	Radiação de onda longa emitida pela superfície ($W.m^{-2}$): (a) para o Globo; (b) para o HN; (c) para o HS	57
Figura 14:	Tendência de radiação de onda longa emitida pela superfície ($W.m^{-2}$): (a) para o Globo; (b) para o HN; (c) para o HS	60
Figura 15:	Variação interanual da radiação de onda longa emitida pela superfície ($W.m^{-2}$): (a) para o Globo; (b) para o HN e (c) para o HS. (teste de Pettitt).	61

Figura 16:	Variação sazonal da radiação de onda longa emitida pela superfície ($W.m^{-2}$): (a) para o Globo; (b) para o HN e (c) para o HS. Comparação de duas décadas distintas: anos iniciais (de 1989 a 1999) e anos finais de (2008 a 2018)	63
Figura 17:	Distribuição das médias mensais da temperatura do ar ($^{\circ}C$) a 2 metros para o HN (curva em vermelho), HS (curva verde) e globo (curva azul) de 1989 a 2018	64
Figura 18:	Distribuição das médias mensais da água precipitável (mm) para o HN (curva em vermelho), HS (curva verde) e globo (curva azul) de 1989 a 2018.....	64
Figura 19:	Temperatura do ar ($^{\circ}C$) a 2 metros: (a) para o globo, (b) para o HN e (c) para o HS (ECMWF)	66
Figura 20:	Tendência de Temperatura do ar a 2m ($^{\circ}C$): (a) para o globo, (b) para o HN e (c) para o HS.....	69
Figura 21:	Variação interanual de Temperatura do ar a 2m ($^{\circ}C$): (a) para o globo, (b) para o HN e (c) para o HS.....	71
Figura 22:	Variação sazonal da Temperatura do ar ($^{\circ}C$) a 2 metros: (a) para o globo, (b) para o HN e (c) para o HS. Comparação de duas décadas distintas: anos iniciais (de 1989 a 1999) e anos finais (de 2008 a 2018)	73
Figura 23:	Água Precipitável (mm): (a) para o globo, (b) para o HN e (c) para o HS.....	74
Figura 24:	Tendência de Água Precipitável (mm): (a) para o globo, (b) para o HN e (c) para o HS.	77
Figura 25:	Variação interanual de Água Precipitável (mm): (a) para o globo, (b) para o HN e (c) para o HS.	79
Figura 26:	Variação sazonal de água precipitável (mm): (a) para o globo, (b) para o HN e (c) para o HS. Comparação de duas décadas distintas: anos iniciais (de 1989 a 1999) e anos finais (de 2008 a 2018)	81
Figura 27:	Comparação entre tendência espacial da temperatura do ar ($^{\circ}C$) a 2 metros (NCEP e ECMWF)	83
Figura 28:	Comparação entre tendência espacial da água precipitável (NCEP e ECMWF)	84
Figura 29:	Tendência espacial da radiação de onda longa emitida pela superfície (NCEP)	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Testes estatísticos para a variável temperatura do ar (°C) a 2 metros	42
Tabela 2 – Testes estatísticos para a variável água precipitável (mm).	50
Tabela 3 – Testes estatísticos para a variável radiação de onda longa emitida pela superfície (W.m ⁻²)	58
Tabela 4 – Testes estatísticos para a variável temperatura do ar (°C) a 2 metros – ECMWF	68
Tabela 5 – Testes estatísticos para a variável água precipitável (mm)	76
Tabela 6 – Comparação dos valores de correlação e tendência para HN, HS e Globo	82

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ADF	Dickey-Fuller Aumentado
AP	Água Precipitável
BRAMS	Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System
CFSR	Climate Forecast Reanalysis System
CMK	Contextual Mann-Kendall
CRU	Climatic Research Unit
DFA	Detrended Fluctuation Analysis
ECMWF	European Center for Medium-Range Weather Forecasts
EQM	Erro Quadrático Médio
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
ERA	Europe Reanalyse Assimilation
EUA	Estados Unidos da América
ENOS	El Niño Oscilação Sul
GEE	Gases de efeito estufa
GRADS	Grid Analysis and Display System
GPS	Global Positioning System
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MERRA	Global Modeling and Assimilation Office
MK	Mann Kendall
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction

NEB	Nordeste do Brasil
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
Pdmah	Precipitação diária máxima por ano hidrológico
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
RCP	Representative Concentration Pathways
SR	Teste estatístico de Spearman Rho
TSM	Temperaturas da Superfície do Mar
UFV	Universidade Federal de Viçosa
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	09
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SIGLAS	14
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO GERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 PROJEÇÕES DO PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	18
2.2 TENDÊNCIAS EM VARIÁVEIS ATMOSFÉRICAS	21
2.3 DADOS DE REANÁLISES	25
2.3.1 Reanálises do NCEP/NCAR	25
2.3.2 Reanálises do ECMWF	26
2.4 TESTES ESTATÍSTICOS	27
2.4.1 Teste de estacionariedade Dickey - Fuller.....	27
2.4.2 Teste de Mann - Kendall	28
2.4.3 Teste de Pettitt	29
3 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 ÁREA DE ESTUDO E DADOS UTILIZADOS	31
3.2 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	32
3.2.1 Testes de Estacionariedade Dicky- Fuller	32
3.2.2 Teste De Normalidade De Shapiro E Wilk	33
3.2.3 Teste De Mann – Kendall	34
3.2.4 Teste De Pettit	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 DISTRIBUIÇÃO SAZONAL MENSAL DAS VARIÁVEIS (NCEP/NCAR)	36
4.2 ANÁLISE DA TEMPERATURA DO AR (°C) A 2 METROS (NCEP/NCAR)....	39
4.2.1 Variação mensal da temperatura do ar (°C) a 2 metros	39
4.2.2 Aplicação dos testes estatísticos para a temperatura do ar (°C) a 2 metros	41
4.3 ANÁLISE DA VARIÁVEL ÁGUA PRECIPITÁVEL (NCEP/NCAR)	47
4.3.1 Variação Mensal da Água Precipitável (mm)	47
4.3.2 Aplicação dos Testes Estatísticos Para a Água Precipitável (mm)	49

4.4	ANÁLISE DA RADIAÇÃO DE ONDA LONGA EMITIDA PELA SUPERFÍCIE (NCEP/NCAR)	55
4.4.1	Variação Mensal da Radiação de Onda Longa Emitida Pela Superfície	55
4.4.2	Análise Estatística da Radiação de Onda Longa Emitida Pela Superfície	57
4.5	DISTRIBUIÇÃO SAZONAL MENSAL DAS VARIÁVEIS (ECMWF)	63
4.6	ANÁLISE DA TEMPERATURA DO AR (°C) a 2 METROS (ECMWF).....	65
4.6.1	Variação da Temperatura do Ar (°C) a 2 Metros	65
4.6.2	Aplicação dos Testes Estatísticos para a Temperatura do Ar (°C) a 2 Metros.....	67
4.7	ANÁLISE DA ÁGUA PRECIPITÁVEL - ECMWF	73
4.7.1	Variação Mensal da Água Precipitável (mm)	73
4.7.2	Aplicação dos Testes Estatísticos Para a Água Precipitável (mm)	75
4.8	COMPARAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DO NCEP/NCAR E ECMWF	81
5	CONCLUSÕES	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas vêm se tornando um assunto cada vez mais recorrente e investigado por diversos cientistas atualmente, devido a maior incidência de problemas ambientais e desastres naturais que sempre assolaram a população.

Segundo Guerra e Marçal (2006) as constantes mudanças ambientais devido às ações antrópicas sempre aconteceram, porém estas estão cada vez mais bruscas e a capacidade em modificar as paisagens também tem aumentado significativamente.

A concentração dos gases de efeito estufa vem aumentando consideravelmente e acredita-se que estes têm sido os principais agentes causadores de efeitos climáticos. As temperaturas médias globais de superfície são as maiores dos últimos cinco séculos e tem aumentado cerca de 0,74 °C nos últimos cem anos e espera-se observar um clima bastante incomum, segundo o 4º Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007).

O IPCC elabora relatórios de avaliação abrangentes sobre o estado da arte científico, técnico e socioeconômico das mudanças climáticas, seus impactos e riscos futuros e mostra opções para reduzir a taxa na qual estão ocorrendo. O IPCC também produz relatórios especiais sobre tópicos acordados por seus governos membros, bem como relatórios metodológicos que fornecem diretrizes para a preparação de inventários nacionais de gases de efeito estufa, destacando, progressivamente, o papel das forçantes antrópicas sobre o processo de aquecimento global. (IPCC, 2007)

Considerando as reanálises associadas ao sistema de observações, atualmente têm sido bastante utilizadas em diversas áreas, devido ao fato de terem uma boa base de dados observacionais, das mais diversas formas, consistindo hoje na melhor forma de se utilizar dados observacionais “reanalizados”, sendo ótima base para estudos globais. (Nóbrega e Cavalcanti, 2010).

Vários trabalhos têm sido produzidos por diversos pesquisadores apresentando análises globais de variáveis meteorológicas na observação de possíveis tendências em variáveis, bem como a ocorrência de acréscimo ou decréscimo nos índices de precipitação quando observáveis durante várias décadas.

Cavalcanti e Mariano (2016) utilizando dados de reanálises do National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) analisaram a tendência anual da água precipitável (AP) média global no período de 1984 a 2014. Seus resultados comprovam a importância das reanálises, apontando tendências significativas de 0,026; 0,013 e 0,019 mm/ano para o H.N.; H.S. e em todo o globo, respectivamente.

Com base nisso, é necessário fazer o seguinte questionamento: se realmente há uma tendência de aquecimento em diversas áreas do globo é possível observar esse efeito através das reanálises? Este trabalho foi realizado com o intuito de estudar os efeitos climáticos e tendências observáveis a partir dos dados de reanálises, dos quais foram obtidas as médias mensais de diversas variáveis meteorológicas para assim encontrar possíveis padrões de comportamento climático global.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal desta tese foi analisar possíveis tendências climáticas das variáveis de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) a 2 m, água precipitável (mm) e radiação de onda longa emitida pela superfície (W. m^{-2}), a partir de informações das médias mensais obtidas das reanálises do National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) e do ERA-Interim/ European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), para o Hemisfério Norte (HN), Hemisfério Sul (HS) e o Globo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Observar 30 anos de dados (1989 a 2018) das médias mensais anuais das variáveis temperatura do ar a 2 m ($^{\circ}\text{C}$), água precipitável (mm) e radiação de onda longa emitida pela superfície (W.m^{-2}) do NCEP/NCAR e do ECMWF em uma mesma resolução, para cada hemisfério e para o globo.
- Aplicar os testes estatísticos para analisar a normalidade, sazonalidade e significância dos dados.
- Analisar as tendências temporais, separando os dados em décadas (anos iniciais e anos finais), visando-se buscar evidências melhores acerca de tendência de aumento ou diminuição das variáveis analisadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROJEÇÕES DO PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As mudanças climáticas tem sido um dos maiores problemas atuais. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) aponta que as emissões antropogênicas de gases do efeito estufa (GEE) são provavelmente a principal causa do aumento da temperatura desde meados do século XX e a maior responsável pelo desequilíbrio ambiental. (IPCC, 2013).

Todas as observações climáticas do planeta têm por base medições diretas e outras medidas remotas obtidas por meio de satélites e outras plataformas. As observações globais praticamente começaram em meados do século XIX para a temperatura e outras variáveis, com conjuntos mais abrangentes e diversificados de observações disponíveis para o período de 1950 em diante. Alguns registros obtidos por reconstruções paleoclimáticas datam de centenas de milhões de anos. Juntos, fornecem uma visão abrangente da variabilidade e alterações a longo prazo na atmosfera, oceano, criosfera e à superfície, que o IPCC utiliza para fazer seus estudos climáticos.

Segundo as projeções do IPCC (2018) afirmam que ocorrerão mudanças em cenários diferentes e, caso se mantenham os níveis atuais, “a previsão para o final do século seria um aumento de 2,6 °C a 4,8 °C na temperatura média global, com incremento de 0,45 a 0,82 metros no nível do mar.”

Ademais, as atividades humanas mudam o clima da Terra substancialmente. Essa conclusão baseia-se em diferentes tipos de evidências, incluindo a história do clima da Terra, observações de mudanças no registro recente de histórico de clima, emergindo novos padrões de extremos climáticos e modelos de clima global (Rosenzweig *et al.*, 2015). Os principais problemas envolvendo mudanças climáticas são o aumento de temperatura, aumento no nível do mar, ilhas de calor, inundações, escassez de água e alimentos, acidificação dos oceanos e eventos extremos.

De acordo com o IPCC (2013) alguns pontos importantes são colocados sobre as mudanças climáticas, tais como:

- Cada uma das três últimas décadas tem sido sucessivamente mais quente na superfície da Terra do que qualquer década anterior desde 1850.
- No Hemisfério Norte, 1983 – 2012 foi provavelmente o período de 30 anos mais quente dos últimos 1400 anos.
- O aumento total entre a média de temperatura entre o período de 1850 – 1900 e o período de 2003 –2012 é de 0,78 °C.
- A temperatura média global à superfície apresenta variabilidade substancial interanual e por décadas.
- A taxa de aquecimento ao longo dos últimos 15 anos com bases na série de dados de 1998 a 2012 é de 0,05 °C [0,05-0,15] por década, que se inicia com um forte El Niño, é menor do que a taxa calculada desde 1951 (entre as séries de dados de 1951 a 2012 – com aumento de 0,12° C [0,08-0,14] por década).
- É muito provável que o número de dias e noites frias tenha diminuído e o número de dias e noites quentes tenha aumentado numa escala global.
- É provável que a frequência de ondas de calor tenha aumentado em grandes partes da Europa, Ásia e Austrália.
- Há provavelmente mais regiões terrestres onde aumentou o número de eventos de forte precipitação do que locais em que diminuiu.
- O aquecimento do oceano domina o aumento na energia armazenada no sistema climático, respondendo por mais de 90% da energia acumulada entre 1971 e 2010.
- A taxa de aumento do nível do mar desde meados do século XIX tem sido maior do que a taxa média durante os dois milénios anteriores (confiança elevada). Ao longo do período 1901 a 2010, o nível médio global do mar subiu 0,19 m [0,17 - 0,21].
- Desde o início da década de 1970 que a perda de massa glacial e a expansão térmica do aquecimento do oceano explicam cerca de 75% do aumento médio global do nível do mar observado.
- As simulações de modelos climáticos a longo prazo mostram uma tendência na temperatura superficial média global de 1951 a 2012 que está de acordo com a tendência observada.

Ainda segundo o IPCC (2013), as alterações climáticas e projeções futuras apontam para:

- As emissões contínuas de gases de efeito de estufa provocarão ainda mais aquecimento e alterações em todos os componentes do sistema climático. A limitação das alterações climáticas exigirá reduções substanciais e sustentadas das emissões de gases de efeito de estufa.
- A alteração da temperatura global da superfície para o final do século XXI provavelmente ultrapassará 1,5°C em relação ao período de 1850 a 1900 em todos os cenários RCPs – Representative Concentration Pathways. O aquecimento continuará para além de 2100 em todos os cenários RCPs. O aquecimento continuará a apresentar variabilidade interanual e decadal e não será uniforme regionalmente.
- A alteração da temperatura média global da superfície para o período de 2016 a 2035 em relação ao período entre 1986 e 2005 estará provavelmente no intervalo de 0,3°C a 0,7 °C.
- A região do continente Ártico irá aquecer mais rapidamente do que a média global, e o aquecimento médio sobre a terra será maior do que sobre o oceano.
- É praticamente certo que haverá mais fenómenos extremos de temperaturas altas e menos fenómenos extremos de temperaturas baixas na maioria das áreas terrestres em escalas cronológicas diárias e sazonais, à medida que as temperaturas médias globais aumentam. É muito provável que as ondas de calor irão ocorrer com maior frequência e duração. Os fenómenos extremos de invernos frios ocasionais continuarão a acontecer.
- O oceano global vai continuar a aquecer durante o século XXI. O calor vai penetrar a partir da superfície do oceano profundo e afetar a circulação oceânica.
- O aquecimento mais forte do oceano está projetado para a superfície nas regiões subtropicais e tropicais do Hemisfério Norte. Em maior profundidade, o aquecimento será mais pronunciado no Oceano Austral. As melhores estimativas do aquecimento do oceano nos 100 metros superiores são cerca de 0,6 °C (RCP-2.6) a 2,0 °C (RCP-8.5) e aproximadamente 0,3 °C (RCP-2.6) a 0,6 °C (RCP-8.5) a uma profundidade de cerca de 1000 m no final do século XXI.
- O nível global médio do mar vai continuar a subir durante o século XXI e em todos os cenários RCP, a taxa de aumento do nível do mar será, muito provavelmente, superior à observada durante o período de 1971 a 2010 devido ao aumento do aquecimento dos oceanos e ao aumento da perda de massa dos glaciares e camadas de gelo.

2.2 TENDÊNCIAS EM VARIÁVEIS ATMOSFÉRICAS

Back (2001) utilizou análise estatística para identificar tendências anuais da temperatura e precipitação pluvial, da estação meteorológica de Urussanga (latitude 28° 31' S, longitude 49° 19' W e altitude de 48,2 m), no período de 1924 a 1998. Ele utilizou análise de regressão e testes paramétricos de Run, Mann-Kendall e Pettitt. Os resultados apontam para tendências significativas no aumento da temperatura média anual e na temperatura média do mês de janeiro no ano de 1965 e não foi identificada nenhuma tendência significativa na temperatura média do mês de julho. Foi identificada ainda uma tendência significativa de aumento da precipitação pluvial total anual e da precipitação pluvial total no quarto trimestre. Nos três primeiros trimestres do ano, nenhuma tendência significativa foi identificada.

Ferrari *et al.* (2012) utilizaram a série histórica de 1976 a 2008, referentes à precipitação e temperatura, registradas pela estação meteorológica da Academia da Força Aérea – AFA/Pirassununga – SP, para análise estatística das tendências anuais da temperatura e da precipitação na região, bem como a variabilidade desses elementos climáticos. Consideraram para o estudo da precipitação, os totais anuais e, para as máximas e mínimas absolutas anuais e a média das máximas e das mínimas. Para a análise da tendência utilizou-se a regressão linear que permitiu a obtenção dos coeficientes de determinação R^2 , erro padrão das estimativas e os limites de confiança. Para a avaliação da tendência climática, tanto da temperatura quanto da precipitação, foram utilizados também, os testes estatísticos não-paramétricos de Mann-Kendall e análise da série histórica considerada, no que se refere às temperaturas máximas, mínimas e médias de temperaturas máximas e mínimas. Foram constatados regimes térmicos mais amenos em determinados anos do período estudado, destacando-se os anos considerados “normais” em relação aos acentuadamente mais quentes para a região. A maior amplitude térmica observada (39 °C) ocorreu em 1994, que poderia ser definido como um ano excepcional e apesar dessas alterações, não se pode afirmar que as tendências verificadas estão relacionadas às mudanças climáticas globais. A análise dos parâmetros estatísticos obtidos para a precipitação mostrou se há ou não tendência de diminuição ou aumento de valores pluviométricos, com destaque para alguns anos mais significativos.

Lima *et al.* (2012) analisaram possíveis tendências climáticas nos padrões de temperaturas mínimas e máximas anuais, precipitação total anual e precipitação média mensal por década no município de Caicó no Estado do Rio Grande do Norte. Para o trabalho utilizaram os dados do acervo do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) através dos quais foram

feitas avaliações para 42 anos de dados. Os resultados apontam para um aumento de temperatura em função do aumento dos valores mínimos, enquanto para a precipitação não se observou tendências significativas.

Dorighello Tomás *et al.* (2012) para analisar a concentração de vapor d'água na atmosfera em áreas urbanas e suas implicações, utilizaram dados de umidade específica, identificando uma tendência de aumento de concentração de vapor d'água na atmosfera de área urbana, com influência da brisa marítima, evaporação d'água das represas e pela urbanização, além de estarem associadas às condições mesoclimáticas que vigoram na região.

Penereiro *et al.* (2012) utilizaram métodos estatísticos para identificar tendências climáticas em dados anuais de temperaturas médias e de precipitação pluviométrica nas capitais dos Estados do Brasil. Foram utilizados os testes estatísticos de regressão linear e os testes não paramétricos de Mann-Kendall e de Pettitt nos dados disponíveis no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Observado o período entre 1961 e 2011, os resultados indicam que das 25 capitais tratadas, houve 40% de tendência positiva na temperatura média, e 88% do índice de precipitação pluviométrica não acusaram tendência.

Lopes e Silva (2013) utilizaram o teste de Mann-Kendall para analisar as tendências e/ou variações nas séries pluviométricas de total anual, média anual, total do período seco e total do período chuvoso de oito macrorregiões do Estado do Ceará. Seus resultados apontam que na Região Metropolitana de Fortaleza as precipitações diminuíram; no Litoral Oeste ocorreram aumento nos valores médios mensais de chuva e forte diminuição de chuvas no período seco; em Sobral/Ibiapaba as precipitações aumentaram no período chuvoso e em Baturité houve diminuição das chuvas no período seco e aumento no período chuvoso. Houve diminuição com significância estatística para as precipitações em todos os parâmetros analisados para a Região Litoral Leste/ Jaguaribe, entretanto, na Região do Sertão Central, as tendências indicam uma diminuição bem significativa. Na região do Cariri/ Centro Sul houve diminuição somente nos valores do período seco, havendo aumento nos outros períodos. Em Crateús houve aumento em todas as séries, exceto no período seco.

Queiroz (2013) procurou avaliar a tendência em 36 séries de precipitações diárias selecionadas na faixa central do Estado de Minas Gerais. Através do software RCLimDex foram avaliadas possíveis tendências nas séries de precipitação diárias máximas por ano hidrológico (Pdmah) e também as possíveis influências do El Niño Oscilação Sul (ENOS) e Oscilação

Decadal do Pacífico (ODP) sobre as Pdmah. Os testes de tendência de Mann-Kendall, de Spearman's Rho e de Regressão Linear indicaram que 8 estações apresentam tendências positivas significativas. Os resultados indicam uma possível influência da Oscilação Decadal do Pacífico na frequência das precipitações diárias máximas por ano hidrológico. Nos períodos de fase quente da ODP, parece haver uma tendência de maior frequência de valores mais elevados de Pdmah do que na fase fria.

Delgado *et al.* (2014), utilizaram dados pluviométricos compreendidos entre o período de 1960 a 2013, com intuito de analisar a tendência climática anual da precipitação e seu aproveitamento para fins não potáveis em região da Amazônia Ocidental. Foram consideradas as áreas de telhados das edificações prediais da Universidade Federal do Acre - Campus Floresta (CF). Calcularam-se as precipitações médias mensais e suas respectivas probabilidades de ocorrência de 75%, 85% e 95%. Foi detectada leve tendência positiva dos dados pluviométricos ao aplicar o teste de Mann-Kendall. O teste de Pettitt não foi significativo para esta série de precipitação além de observar uma redução significativa para a estação chuvosa amazônica.

Costa *et al.* (2015) analisaram séries temporais de temperatura e precipitação no período de 1961 a 2011, a partir dos registros da estação meteorológica da EPAGRI/CIRAM localizada no município de Lages-SC, Brasil. As correções das falhas de leituras foram feitas a partir do método da ponderação regional, sendo proposto um modelo de regressão linear alternativo que apresentou menor Erro quadrático Médio - EQM. As metodologias de transformada de Fourier, transformada de Ondeletas e o teste estatístico de Mann-Kendall foram utilizadas. Detectou-se a ocorrência de ciclos anuais na temperatura média mensal e ciclos que variam de 3 a 5 anos na precipitação acumulada mensal. Há tendência positiva no padrão de precipitação acumulado mensal a partir do evento El Niño de 1983, de acordo com o teste de Mann-Kendall, e nas temperaturas mínimas e máximas de alguns meses, tanto absolutas quanto em relação às médias mensais.

Segundo Salviano *et al.* (2016), análises espaciais de tendências permitem observar as mudanças no comportamento e determinar em quais regiões uma determinada variável vem sofrendo mudanças ao longo do tempo e utilizaram esse propósito como objetivo do seu trabalho como análise das tendências temporais da precipitação e da temperatura média no Brasil, utilizando o método Contextual Mann-Kendall (CMK), utilizando dados espacialmente distribuídos elaborados pelo Climatic Research Unit (CRU), entre os anos 1961 e 2011. Foram

analisadas a umidade relativa e a evapotranspiração como auxílio na interpretação dos resultados. Os resultados apontam tendências não significativas em mais de 70% do território brasileiro em todos os meses para a variável precipitação, porém a temperatura média apresentou tendência significativa em grande parte do Brasil ao longo de todo ano. Portanto a evapotranspiração apresentou um comportamento diretamente proporcional à temperatura, porém a umidade relativa apresentou comportamento inversamente proporcional. Os autores ressaltam que a continuidade dessas tendências poderá resultar em impactos na agricultura e no ciclo hidrológico, e conseqüentemente para a fauna e flora e para a população.

Cavalcanti *et al.* (2016) analisaram a tendência anual da média global da água precipitável (*AP*) durante o período de 1984 a 2014. Utilizaram dados extraídos das reanálises do National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) para avaliar a distribuição espacial da tendência (*AP*) e na aplicação estatística foram utilizados testes de significância estatísticas de Mann-Kendall e *t* de Student aplicados para as tendências das séries globais. Os resultados apontaram que o valor médio de *AP* para todo o período é de 24 mm correspondendo a um volume estimado para toda a atmosfera do globo de cerca de 12 trilhões de metros cúbicos, resultando em tendências significativas de 0,026 mm/ano para o HN; 0,013 mm/ano para o HS; e 0,019 mm/ano para todo o globo, respectivamente. Áreas específicas do globo apontam tendências positivas de 0,09 mm/ano e outras negativas de até -0,09 mm/ano demonstrando uma distribuição não homogênea dessa tendência no globo.

Menezes *et al.* (2016) analisaram a variabilidade e tendência da precipitação anual no Estado do Pará, situado na Amazônia Brasileira, utilizando séries históricas de 66 postos pluviométricos, disponíveis na rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), no período de 1982 a 2011. Para análise estatística foram utilizados testes não-paramétricos de Mann-Kendall (MK) e Spearman Rho (SR) para detectar possíveis tendências climáticas. Os resultados obtidos apontam uma grande variabilidade espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará relacionada à atuação de fenômenos climáticos como o El Niño. De todos os postos analisados, apenas 6 deles apresentaram tendências significativas a um nível de significância de 5%, que podem estar relacionadas a atuação de fenômenos climáticos na região.

Berigo *et al.* (2017) fizeram uma análise com uso do teste de Mann-Kendall e de regressões lineares simples, da tendência temporal da precipitação máxima diária anual, mensal

e total anual do município de Formiga – MG, utilizando os dados brutos da série histórica de precipitação do município, no período de 1985 a 2015, obtidos no serviço Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA). Por meio de regressão linear simples verificou-se que não houve tendência nos dados de precipitação em função do tempo, já que foram obtidos, para todas as séries, baixos coeficientes de determinação. O teste de Mann-Kendall mostrou que apenas o mês de abril apresentou discreta tendência na redução da quantidade de precipitação, porém, esta não foi significativa estatisticamente. A análise das séries de precipitação máxima diária anual, precipitação mensal e total anual de precipitação, registradas no período analisado, aponta que não houve tendência temporal significativa, tanto relativo ao seu aumento, quanto à sua redução.

2.3 DADOS DE REANÁLISES

Os dados das reanálises representam o estado observado da atmosfera por diferentes meios, como observações convencionais, satélites, estações automáticas, navios, aviões, etc. Essas informações são interpoladas em pontos de grades para ter uma consistência física mediante modelo numérico da atmosfera.

Há duas gerações de dados de reanálises e uma delas compreende três principais conjuntos de dados: O NCEP-R1 produzido e lançado pelo National Oceanic and Atmospheric Administration (NCEP); O ERA-40 do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) e; JRA-25 da Japanese Meteorological Agency. Para corrigir vários problemas identificados no NCEP-R1, uma segunda versão foi lançada pelo NCEP, o NCEP-R2. O ERA - 40 foi encerrado em 2001 e o JRA - 25 também em 2004. (Stüker *et al.*, 2016).

Recentemente uma nova geração de reanálises foram produzidas e lançadas (Carvalho *et al.*, 2013): ERA-Interim do ECMWF (Dee *et al.*, 2011); CFSR do NCEP (Saha *et al.*, 2010); MERRA da NASA (Rienecker *et al.*, 2011). Devido aos avanços operacionais na previsão do tempo e também aos esforços feitos para melhorias com base nas reanálises anteriores, essas bases de dados são bastante significativas, confiáveis e são utilizadas até hoje.

2.3.1 DADOS DE REANÁLISES DO NCEP/NCAR

Nos últimos anos, a alternativa usada para a obtenção de dados meteorológicos em locais com poucas informações tem sido os dados de reanálises do NCEP (National Centers for

Environmental Prediction) e NCAR (National Center for Atmospheric Research). O projeto reanálise do NCEP/NCAR teve início por volta de 1995 e gerou uma base de informações em pontos de grades referentes a variáveis meteorológicas diversas. Em cada processamento aplica-se o estado atual da arte em análise e previsão dentro de um rígido controle de qualidade. (Kalnay *et al.* 1996; Kistler *et al.* 2001).

O objetivo do projeto é produzir um registro de análises globais dos campos atmosféricos, servindo para diversos estudos e para apoio às necessidades de comunidades de pesquisa e monitoramento do clima, recuperando dados de superfície terrestre, radiossonda, satélites, etc., controlando a qualidade desses dados com um sistema de assimilação de dados. A base de dados foi reforçada com várias fontes de observações que não estão disponíveis em tempo real das operações por diferentes países e organizações. (Kalnay *et al.*, 1996).

Diversos estudos tem analisado a qualidade das informações de dados de reanálises do National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) com informações obtidas de dados observados e/ou gerados por outros modelos numéricos da atmosfera e normalmente ressaltam uma boa qualidade destes dados (Higgins *et al.*, 1996; Mo e Higgins, 1996; Sudradjat *et al.*, 2005; Vey *et al.*, 2010; Koulali *et al.*, 2012). As reanálises do NCEP/NCAR constituem uma base de dados representativos das condições globais e já foi utilizado com sucesso em outros estudos (Cavalcanti *et al.*, 2002 e 2008; Nóbrega e Cavalcanti, 2010).

2.3.2 DADOS DE REANÁLISES DO ECMWF

O ERA - Interim constitui a plataforma de dados de reanálises atmosférica global mais recente produzida pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF, e foi lançada em 2009. Possui uma série de melhorias quando comparado com seus antecessores (ERA-15 e ERA-40). Abrange o período a partir de 1 de janeiro de 1979, e continua a ser desenvolvido até hoje. Inicialmente seu principal objetivo foi de melhorar o período entre os anos de 1990 e 2000 onde passou a existir uma quantidade maior de dados disponíveis. A resolução horizontal do modelo atmosférico é de aproximadamente 79 km em uma grade gaussiana reduzida. É atualizado duas vezes por dia (às 00:00 UTC e 12:00 UTC), mas oferece dados de seis em seis horas (às 00:00 UTC, 06:00 UTC, 12:00 UTC e 18:00 UTC). (Dee *et al.*, 2011).

O objetivo do ERA-Interim é a correção de problemas de difícil assimilação de dados encontrados durante a produção do ERA-40, relatados principalmente com a representação do ciclo hidrológico, a qualidade da circulação estratosférica e a consistência no tempo de campos geofísicos novamente analisados. O segundo objetivo é o de melhorar o projeto em vários aspectos técnicos das reanálises, tais como seleção de dados, controle de qualidade, correção de viés e monitoramento de desempenho, cada um dos quais podendo ocasionar grande impacto sobre a qualidade dos produtos das reanálises (Dee *et al.*, 2011).

2.4 TESTES ESTATÍSTICOS

2.4.1 TESTE DE ESTACIONARIEDADE DICKEY-FULLER

O teste de Dickey-Fuller (Dickey, D. A.; Fuller, 1979 e 1981) é muito utilizado na literatura e serve para analisar a estacionariedade das séries temporais, fato importante para detectar tendências.

Galvani *et al.* (2012) aplicaram o teste de Dickey-Fuller para comprovar a estacionariedade da série histórica de precipitação, utilizando métodos estatísticos como 'Boxplot' e 'histograma de frequência' observando a variabilidade e, função de autocorrelação para comprovar a presença ou não de tendência. Os resultados indicam que o posto denominado de F4-028 apresentou média de precipitação de 1.956,0 mm, e os postos F4-029 e F4-040, 2.300,7 mm e 2.868,8 mm, respectivamente. A função de autocorrelação, aplicada aos três postos pluviométricos, indicou que os valores decaíram para zero, evidenciando uma série estacionária, mas com sazonalidade. O teste Dickey-Fuller indica que as três séries analisadas são estacionárias, sem tendência de acréscimo ou redução das precipitações.

Pereira *et al.* (2015) utilizaram funções para comprovar a presença de tendência e estacionariedade nos dados através do teste Dickey-Fuller, decompondo a série em duas componentes de tendência, sendo elas a sazonalidade e uma parte aleatória. Os autores analisaram que houve uma tendência de queda da temperatura média do ar entre os anos de 1988 a 1989, em uma taxa de 1,68 °C de um ano para outro. Além disso, o ano de 1990 apresentou a menor temperatura média do ar e que, entre os anos de 1974 e 1989, apresentaram uma diminuição da temperatura.

Costa *et al.* (2015), aplicaram o teste Dickey-Fuller para comprovar a presença de tendência e estacionariedade nos dados, com o objetivo de apresentar um estudo da aplicação de modelos de séries temporais na análise de precipitação para o brejo paraibano, utilizando a descrição, o ajuste de modelo e a previsão da série. A precipitação apresentou comportamento de forma muito irregular, devido à sazonalidade. Foram feitas análises de séries temporais aplicando os modelos de ‘Box-Jenkins’ para realização de previsões, certificando que o melhor método para o ajuste da série e previsão foi descrito pelo modelo ‘SARIMA’, o qual obteve um bom ajuste para a variável em estudo.

2.4.2 TESTE DE MANN – KENDALL

Segundo Goossens e Berger (1987), o teste estatístico não-paramétrico de Mann-Kendall (Mann, 1945 e Kendall, 1975) é o melhor método para análise de possíveis mudanças climáticas em séries temporais climatológicas, indicando aproximadamente o período ou local inicial de determinada tendência.

Limeira (2008) utilizou séries temporais de precipitação pluviométrica de 54 municípios (entre 1910 e 2006) para estimar a variabilidade e a tendência das chuvas no Estado da Paraíba, além de modelos matemáticos (do desvio acumulado) e o teste estatístico de Mann-Kendall, em vários municípios, com destaque para a microrregião do Brejo, que apresentou tendência crescente de precipitação em todos os municípios analisados. Já para as microrregiões do Alto Sertão, Sertão e Cariri, os resultados foram coerentes, visto que essas microrregiões são susceptíveis a ocorrência de eventos climáticos extremos de chuva e de seca.

Rodrigues *et al.* (2010), coletaram informações de órgãos públicos e dados climáticos junto à estação meteorológica do INMET instalada na UFV para mostrar impactos no comportamento climático local urbano de Viçosa. Utilizaram variáveis climáticas e o teste Mann-Kendall, dos quais foram observados que as temperaturas mínimas estão apresentando tendências, enquanto que temperaturas máximas, não apresentaram grandes alterações em seus padrões. Observou-se que as temperaturas médias de Viçosa, Região Sudeste do Brasil e Minas Gerais apresentam forte correlação e por meio do teste de T-Student mostraram-se estatisticamente significativos a níveis de significância de 10%, 5% e 1%, e os desvios positivos das temperaturas mínimas são influenciados pelas pressões de vapor e de saturação.

Ferreira *et al.* (2015) aplicaram a análise de regressão simples e o teste não paramétrico de Mann-Kendall para a cidade de Juiz de Fora, usando a série histórica de 1972 a 2014 de temperaturas máximas e mínimas do ar. Os resultados indicam tendência significativa no aumento da temperatura máxima anual nos meses de abril, setembro e dezembro, mas não houve tendência a aumento linear da temperatura mínima anual ou mensal.

Analisando as tendências temporais da precipitação e da temperatura média no Brasil, utilizando o método Mann-Kendall, Salviano *et al.* (2016) observaram tendências não significativas de precipitação em mais de 70% do território brasileiro em todos os meses. Porém a temperatura média apresentou tendência positiva significativa em grande parte do Brasil ao longo de todo ano. A evapotranspiração apresentou um comportamento diretamente proporcional à temperatura, enquanto a umidade relativa apresentou comportamento inversamente proporcional.

Ferreira *et al.* (2016) observaram o comportamento das temperaturas da superfície do mar (TSM) nas áreas dos El-Niños no Oceano Pacífico e nas áreas correspondentes ao Dipolo (Norte-Sul), no oceano Atlântico, durante o período de 1982 a 2014, e utilizaram o teste não-paramétrico de Mann Kendall para avaliar as tendências das séries temporais aos níveis de 1% e 5% de probabilidades. De acordo com o teste, apenas as áreas do Atlântico Norte e do Dipolo apresentaram uma tendência crescente, ao nível de significância de 1%.

2.4.3 TESTE DE PETTITT

O teste de Pettit (Pettitt, 1979) é utilizado para detectar tendências e variações climáticas nas séries mensais. Blain *et al.* (2011) utilizaram a metodologia dos métodos paramétricos (teste T, F e Razão da Verossimilhança) e não paramétricos (teste sazonal de Mann-Kendall e de Pettitt). As séries de T_{\min} das localidades de Campinas, Cordeirópolis, Ribeirão Preto e, especialmente Ubatuba, apresentam fortes indícios de tendências e variações climáticas nos últimos 60 anos. Nas séries de Monte Alegre do Sul e Pindorama tais indícios são observados de forma pouco significativa.

Com o intuito de motivar um grupo de estudantes de graduação no uso de alguns conteúdos estatísticos envolvendo testes paramétricos e não paramétricos, Penereiro *et al.* (2012) realizaram um estudo das variações da temperatura média e da precipitação pluviométrica para identificar possíveis tendências climáticas. Foram feitas análises de regressão e aplicados os testes de Mann-Kendall e Pettitt, em dados medidos para a cidade de

Campinas, no período de 1910 a 2009. Os resultados indicam que não houve tendência na variável precipitação, mas foi identificado um significativo aumento da temperatura média que, possivelmente, está relacionada à influência antrópica iniciada a partir de 1955. Os estudos resultaram em várias discussões entre os estudantes e os pesquisadores envolvidos, especialmente sobre como detectar tendência a uma série de dados e decidir por qual teste estatístico empregar.

Já em estudos posteriores, Penereiro *et al.* (2013) procuraram identificar, por meio de testes estatísticos, pontos de mudança no comportamento hidrológico e climático em séries temporais que, dependendo da localidade, possuem diferentes períodos de intervalo de tempo. Aplicaram a análise de regressão linear e os testes não paramétricos de Mann-Kendall e de Pettitt. Os resultados, apresentados em forma de gráficos, tabelas e mapas, confirmam que a maioria dos locais avaliados não registrou tendências, em particular na precipitação pluviométrica e na vazão de rios. Contudo, as análises dos dados das temperaturas revelaram vários locais com tendências significativas confirmadas naquela região brasileira.

Visando à identificação de possíveis tendências nos índices de temperaturas médias do ar e de precipitações pluviométricas de alguns municípios do estado de São Paulo, Penereiro *et al.* (2014) empregaram a estatística paramétrica, com aplicação da análise de regressão, além da estatística não paramétrica, por meio dos testes de Mann-Kendall e de Pettitt. Foi identificado um ganho de conhecimento com relação aos conteúdos estatísticos desenvolvidos pela disciplina, indicando que os estudantes envolvidos ficaram mais motivados ao usarem a estatística numa situação da atualidade, especialmente no que diz respeito aos impactos causados pelas mudanças climáticas em alguns índices de parâmetros climatológicos.

Santos *et al.* (2016) aplicaram os testes estatísticos usados para a identificação da não estacionariedade de Mann-Kendall e Spearman Rho, além do teste de Pettitt para localizar o ponto de ruptura na série, com o objetivo de analisar as vazões máximas anuais diárias da bacia hidrográfica do Rio Pardo. Foi identificada uma tendência crescente na série de vazão anual máxima diária do Rio Pardo, logo, esta não se caracterizou como estacionária. Como os eventos de precipitação são estatisticamente estacionários, a substituição da vegetação natural por pastagens plantadas, representa um dos principais fatores do comportamento da série de vazão máxima não ser mais estacionária.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO E DADOS UTILIZADOS

O NCEP – National Centers for Environmental Prediction e NCAR – National Center for Atmospheric Research possuem séries históricas de reanálise desde 1948 até a atualidade, estão dispostos em pontos de grades, com $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ de resolução espacial.

O ERA-Interim do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) no projeto “ECMWF Re-Analysis” (ERA) possui dados desde 1950 até o presente. Sua resolução espacial padrão é de 30 km e 137 níveis verticais. Os arquivos contêm dados de todo o globo, tendo a opção de recortar os limites que interessam antes de baixar os dados. As coordenadas geográficas podem estar no sistema latitude/longitude ou como pontos de grade.

Foram obtidos os dados de reanálises de Temperatura do ar ($^\circ\text{C}$) a 2,0 m, dados de Água Precipitável (mm), dados de Radiação de Onda Longa Emitida pela Superfície ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), disponíveis no NCEP/NCAR (domínio compreendido de 90°S a 90°N e de -180°W a 180°E), sendo utilizados o período de janeiro de 1989 até dezembro de 2018. Já os dados do Era Interim possuem a resolução espacial do conjunto de dados de 80 km ($0,75^\circ$) em 60 níveis verticais da superfície até 0,1 hPa.

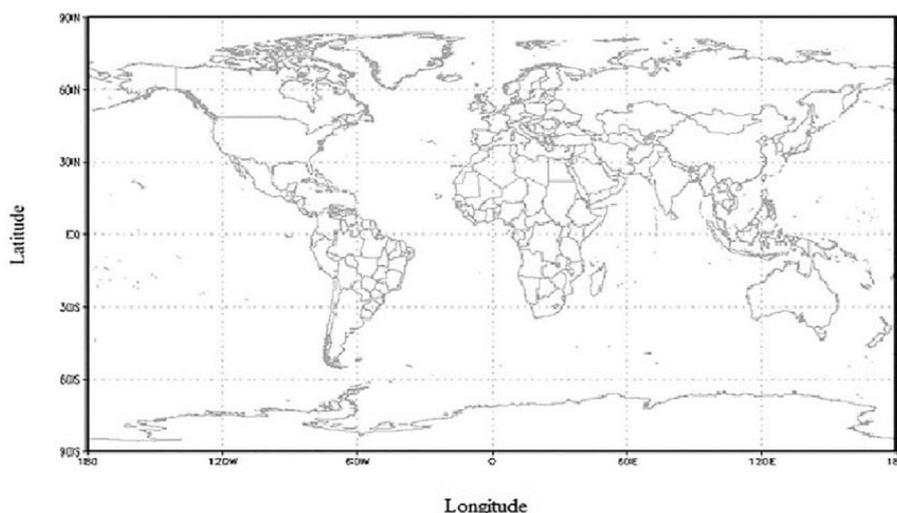


Figura 1: Área de estudo do Globo Terrestre (domínio compreendido de 90°S a 90°N e de -180°W a 180°E).

As análises foram realizadas por meio de scripts através do software estatístico *R 3.0.2* bem como a construção de tabelas e gráficos. A espacialização dos dados foi realizada através do aplicativo auxiliar de distribuição livre GRADS – Grid Analysis and Display, que é muito

utilizado em vários estudos e pesquisas para manipulação de dados e geração de representações gráficas, através de expressões fornecidas por linhas de comando.

Para cada uma das variáveis acima citadas, foram obtidas as médias anuais e mensais, bem como análises das tendências nas séries temporais para cada tipo de variável. As séries obtidas do ECMWF foram comparadas com as séries de dados do NCEP/NCAR para cada variável. Para análise estatística aplicou-se os testes estatísticos de estacionariedade, normalidade para análise de tendência e sazonalidade das séries de dados.

3.2 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

3.2.1 TESTES DE ESTACIONARIEDADE DICKY- FULLER

O teste Dicky-Fuller pressupõe que a série é gerada por um processo autorregressivo de ordem AR(p). O número de raízes unitárias (ordem de integração) é dado pelo número de vezes que a série deve ser diferenciada para se tornar estacionária. O teste apresenta duas variações, o teste Dickey-Fuller (1979) e o Dickey-Fuller Aumentado (1981). O mais usual é o teste Dickey-Fuller Aumentado (DFA) descrito a seguir segundo Margarido e Junior (2006) e Dickey Fuller (1979, 1981):

Hipótese do teste:

$H_0 = \phi_1 = 1$: a série é não estacionária;

$H_1 = \phi_1 = 0$: a série é estacionária.

O teste DFA é realizado a partir da estimação de uma autorregressão de Z_t em função de Z_{t-1} e dos termos defasados de ΔZ_t por mínimos quadrados.

A estatística do teste:

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum_{t=1}^N Z_{t-1} Z_t}{\sum_{t=1}^N Z_{t-1}^2} \quad (1)$$

Em seguida, estima-se a variância amostral:

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (\Delta Z_t - \hat{\alpha} Z_{t-1})^2 \quad (2)$$

Calcula, a seguir, o desvio-padrão do coeficiente:

$$S(\hat{\alpha}) = \frac{s}{\sqrt{\sum_{t=1}^T z_{t-1}^2}} \quad (3)$$

O valor calculado da estatística:

$$\hat{t} = \frac{\hat{\alpha}}{s\hat{\alpha}} \quad (4)$$

O critério é de rejeição da hipótese nula se $\hat{t} < \tau$, em que τ são os valores críticos obtidos por meio de simulação de Monte Carlo.

3.2.2 TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO E WILK

Proposto por Shapiro e Wilk (1965), a estatística verifica se uma determinada variável é oriunda de uma distribuição normal (Shapiro; Wilk, 1965). O teste Shapiro-Wilk é um teste abrangente e tem se tornado um dos testes de normalidade mais utilizados, por suas boas propriedades, quando comparado aos demais testes (Mendes e Pala, 2003; Oztuna *et al.*, 2006; Razali e Wah, 2011).

Segundo Razali e Wah (2011), o teste Shapiro-Wilk foi o primeiro a conseguir detectar desvios de normalidade originados de assimetria ou achatamento dos dados, ou ambas as situações. A estatística de teste depende da correlação entre os dados de estudo e seus escores de normalidade (Shapiro; Wilk, 1965), sendo definida por:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i \bar{y})^2} \quad (5)$$

em que:

y_i – valores observados;

\bar{y} – média amostral;

$$a_i = (a_1, \dots, a_n) = \frac{m'V^{-1}}{(m^T V^{-1} V^{-1} m)^{\frac{1}{2}}}$$

m' - vetor dos valores esperados das estatísticas de ordem normal padrão;

V – matriz de covariância de tamanho;

A hipótese nula para o teste é, portanto, que a variável Y tenha uma distribuição normal. Assim, se o valor de W for menor que o nível de significância α , a hipótese nula é rejeitada, sugerindo que o conjunto de dados não vem de uma distribuição normal.

3.2.3 TESTE DE MANN – KENDALL

A tendência nas séries temporais foi avaliada pelo método de Mann-Kendall. Este método é sugerido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para a verificação de tendências em séries temporais (Yue *et al.*, 2002). Segundo Silva (2004) a estatística S usada no teste de Mann-Kendall é dada por

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{M-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (6)$$

em que

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} -1, & (x_i - x_j) < 0 \\ 0, & (x_i - x_j) = 0 \\ 1, & (x_i - x_j) > 0 \end{cases} \quad (7)$$

A estatística S tende a uma distribuição normal com média $E[S] = 0$ e variância dada por

$$\text{var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (8)$$

em que

n : número de elementos da série

t_p : número de dados com valores iguais num certo grupo

q: número de grupos contendo valores iguais na série de dados.

Valor positivo de S indica tendência positiva e valor negativo indica tendência negativa na série. Portanto, sabendo-se que S é normalmente distribuído pode-se checar se a tendência é significativa a 99% ($\alpha = 0,01$) e 95% ($\alpha = 0,05$), avaliando Z(S) por

$$Z(S) = \begin{cases} \frac{(S-1)}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{(S+1)}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

Também foi obtida a inclinação da linha de tendência pelo método de regressão linear e calculado o coeficiente de correlação entre os valores observados de AP e os valores inferidos pela reta de tendência. Neste caso, aplicado o teste *T-Student* com significância estatística de 99% ($\alpha = 0.01$) e 95% ($\alpha = 0.05$) com $(n-2)$ graus de liberdade, ($n = 30$). A Correlação crítica (r_c) para a qual torna-se estatisticamente significativa, foi obtida por:

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (10)$$

$$r_c = \frac{t_c}{\sqrt{(n-2) + t_c^2}} \quad (11)$$

Para $r > r_c$ a hipótese nula é descartada caracterizando valor significativo à 99% e (ou) 95% respectivamente.

3.2.4 TESTE DE PETTIT

Dentre uma variedade de métodos estatísticos para a detecção de um ponto de mudança em uma série temporal (Sharkey e Killick, 2014; Vezzoli *et al.*, 2012), o teste não paramétrico proposto por Pettitt (1979) serve para detectar a ocorrência da mudança abrupta nas séries de dados.

O teste de Pettitt utiliza uma versão do teste de Mann-Whitney $U_{t,T}$, o qual verifica se duas amostras (X_1, \dots, X_t e X_{t+1}, \dots, X_n) são da mesma população ou não (Penereiro e Ferreira, 2012; Uliana *et al.*, 2015). A estatística de teste conta o número de vezes que o valor da primeira amostra excede o valor da segunda amostra. A hipótese nula (H_0) do teste de Pettitt admite ausência de um ponto de mudança na série (Uliana *et al.*, 2015), contra a alternativa (H_1) de que existe um ponto de mudança. A estatística não paramétrica é definida como:

$$K_T = \text{Max}_{1 \leq t \leq T} |U_{t,T}| \quad (12)$$

e

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (13)$$

em que:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x > 0 \\ 0, & \text{se } x = 0 \\ -1, & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad (14)$$

Logo, a estatística $U_{t,T}$ é calculada para valores de $1 \leq t \leq T$, e a estatística K_T do teste é o máximo valor absoluto de $U_{t,T}$. Essa estatística localiza o ponto em que houve uma mudança brusca na média de uma série temporal (Penereiro e Ferreira, 2012), onde sua significância é obtida através da equação:

$$P \cong 2 \exp\left(\frac{-6K_t^2}{T^3+T^2}\right) \quad (15)$$

em que,

P: nível de significância;

K_T : valor crítico;

T: número de anos da série histórica.

Quando P é menor do que o nível de significância específica neste estudo (0,05), a hipótese nula é rejeitada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DISTRIBUIÇÃO SAZONAL MENSAL DAS VARIÁVEIS (NCEP/NCAR)

Serão analisadas as figuras geradas a partir dos dados de reanálises do NCEP/NCAR para as variáveis: Temperatura do ar (°C) a 2,0 metros, Água precipitável (mm), Radiação de onda longa emitida pela superfície (W.m^{-2}) no período entre janeiro de 1989 a dezembro de 2018.

A análise da figura 2 para a variável temperatura do ar (°C) a 2,0 metros da superfície no HN aponta que os maiores valores se apresentam entre julho e agosto (21°C) e menores entre dezembro e março (9 °C) coincidindo com o período de verão e inverno, respectivamente. Ao passo que a temperatura média do ar para o HS apresenta maiores valores para os meses janeiro a março (16,5°C) e menores entre junho e agosto (11°C). Os valores globais encontram-se oscilando em torno da média de 15°C (entre 12 ° a 16° C). Pode-se observar que, comparando-se os valores de temperatura, o HN apresenta valores mais elevados que o HS, devido ao fato

de que o primeiro hemisfério apresenta uma área continental superficial maior do que o HS. Como este último tem uma extensão oceânica maior, a amplitude térmica será menor devido à elevada capacidade térmica que a água possui.

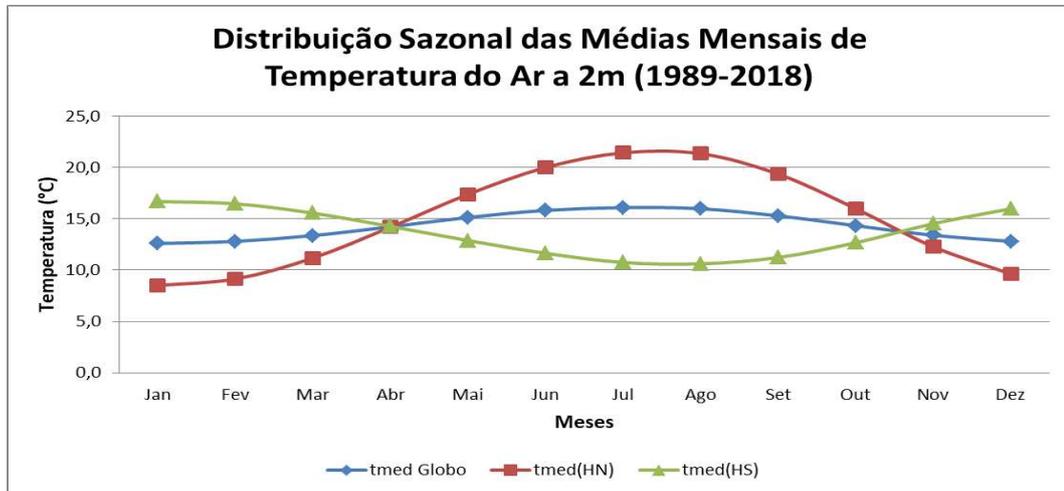


Figura 2: Distribuição sazonal das médias mensais da temperatura média do ar (°C) a 2 metros para o HN (curva em vermelho), HS (curva verde) e para o Globo (curva azul).

Na figura 3 foram plotados os valores médios mensais de água precipitável (mm). No HN há valores mais baixos de água precipitável (20 mm) entre os meses de dezembro a março – coincidindo com o período de inverno no HN – e valores mais altos entre os meses de julho e agosto (32 mm) – coincidentes com o período de verão no hemisfério HN. Para o HS, os máximos valores são obtidos durante os meses de janeiro a março, coincidindo o período de verão no HS (em torno de 28 mm). Já os menores valores são obtidos durante os meses de julho a setembro – período de inverno – em torno de 20 mm. A curva global apresenta-se suavizada em relação às demais, com valores médios oscilando em torno de 25 mm durante todo o período. Como a evaporação está diretamente relacionada ao aumento de temperatura do ar na superfície e à energia disponível pela radiação solar, o aumento do teor de água na atmosfera depende do aumento dessas variáveis, estando, portanto, correlacionadas.

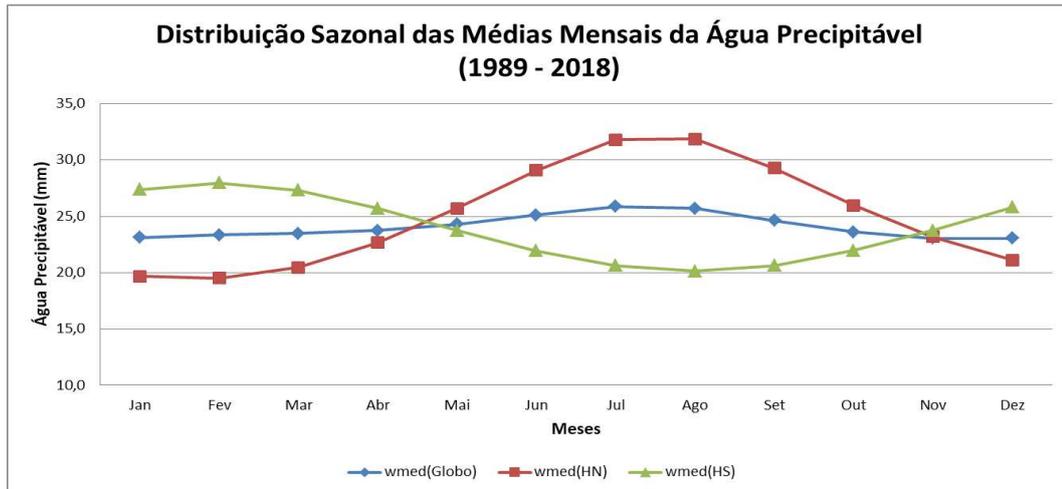


Figura 3: Distribuição sazonal das médias mensais de água precipitável (mm) para o HN (curva em vermelho), HS (curva verde) e Globo (curva azul) no período de janeiro de 1989 a dezembro de 2018.

A figura 4 apresenta a distribuição da radiação de onda longa emitida ($W.m^{-2}$) pela superfície terrestre ROL_S . Para o HN, os maiores valores de ROL_S encontram-se entre julho e agosto ($430 W.m^{-2}$) e os menores de janeiro a fevereiro (em torno de $370 W.m^{-2}$), coincidentes com o período de verão e inverno, respectivamente. Já o HS os maiores valores são de janeiro a fevereiro ($406 W.m^{-2}$) e os menores entre julho e setembro (em torno de $380 W.m^{-2}$). A curva com valores globais oscila em torno dos valores médios de $400 W.m^{-2}$ (mínimos de 388 e máximos de $405 W.m^{-2}$). Esses valores estão de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann, que relaciona a energia irradiada de um corpo, por unidade de área e por unidade de tempo, à quarta potência de sua temperatura absoluta ($ROL = \sigma.T^4$). Assim, ao substituir a uma temperatura média de $15^{\circ}C$, estima-se um $ROL = 390 W.m^{-2}$. Para um $ROL = 400 W.m^{-2}$ estima-se um valor de temperatura em torno de $16,8^{\circ}C$. Pode-se observar o HN apresenta maiores valores no verão em comparação com o HS, devido a maior área de cobertura continental. Além disso, os padrões apresentados são bem parecidos com os padrões de temperatura do ar e de água precipitável para ambos os hemisférios.

Portanto, existe uma interação entre as três variáveis apresentadas, pois, se a superfície apresenta um aumento de temperatura, essa relação é devida a uma maior quantidade de radiação absorvida pela superfície. O teor de umidade no ar é diretamente relacionado com a temperatura do ar. Quando há um maior aquecimento, há maior concentração de vapor d'água na coluna atmosférica, resultando em aumento da água precipitável.

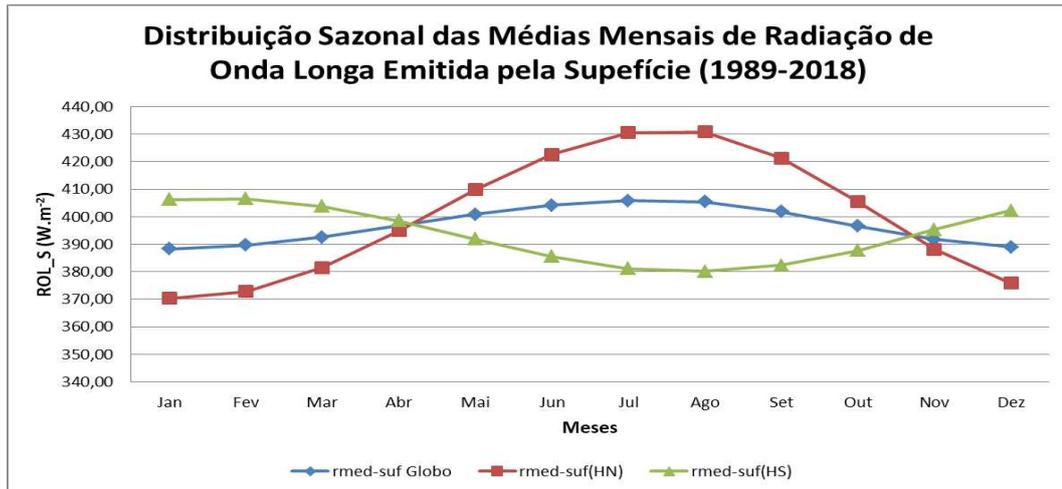


Figura 4: Distribuição sazonal das médias mensais de radiação de onda longa emitida pela superfície ($W.m^{-2}$) para o HN, HS e Globo (1989-2018).

4.2 ANÁLISE DA TEMPERATURA DO AR ($^{\circ}C$) A 2 METROS (NCEP/NCAR)

4.2.1 Variação mensal da temperatura do ar ($^{\circ}C$)

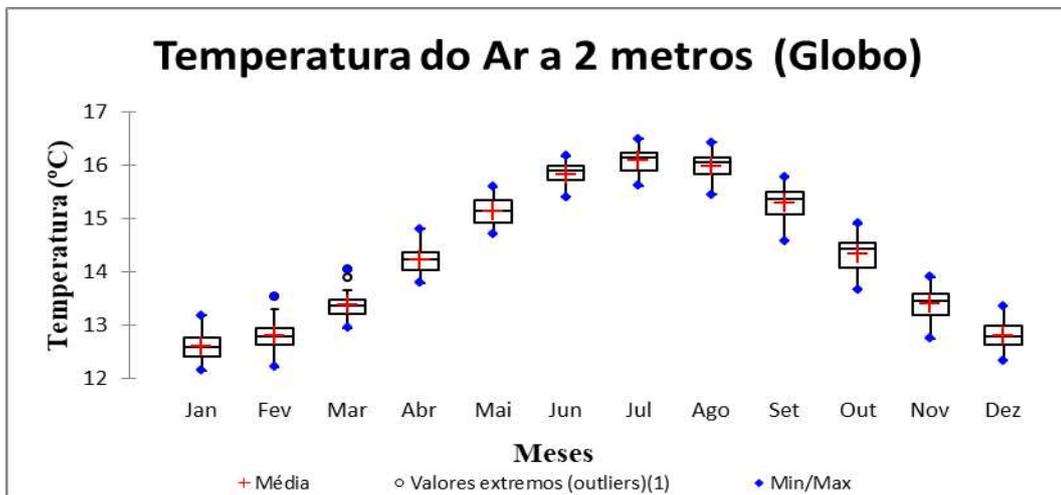
O box plot é uma ferramenta estatística importante pois permite visualizar a distribuição e a discrepância entre os dados (*outliers*). As figuras a seguir foram plotadas em formato box plot os valores médios de cada variável analisada a cada mês, no período de janeiro de 1989 a dezembro de 2018 obtidos a partir dos dados de reanálises do NCEP/NCAR.

A figura 5 (a) apresenta médias mensais para todo o globo. Os meses que obtiveram maiores dispersões foram os meses de maio e outubro. Já os meses com menores dispersões foram os meses de fevereiro, março e abril. Há outra variabilidade que ocorre entre os meses de junho. O mês de março possui um valor atípico de temperatura na série. Os maiores valores de temperatura do ar encontram-se no mês de julho ($16^{\circ}C$) enquanto os valores mais baixos encontram-se entre dezembro e janeiro (em torno de $12^{\circ}C$). A média encontra-se em cerca de $14,8^{\circ}C$ corroborando com a média global encontrada na literatura de $15^{\circ}C$.

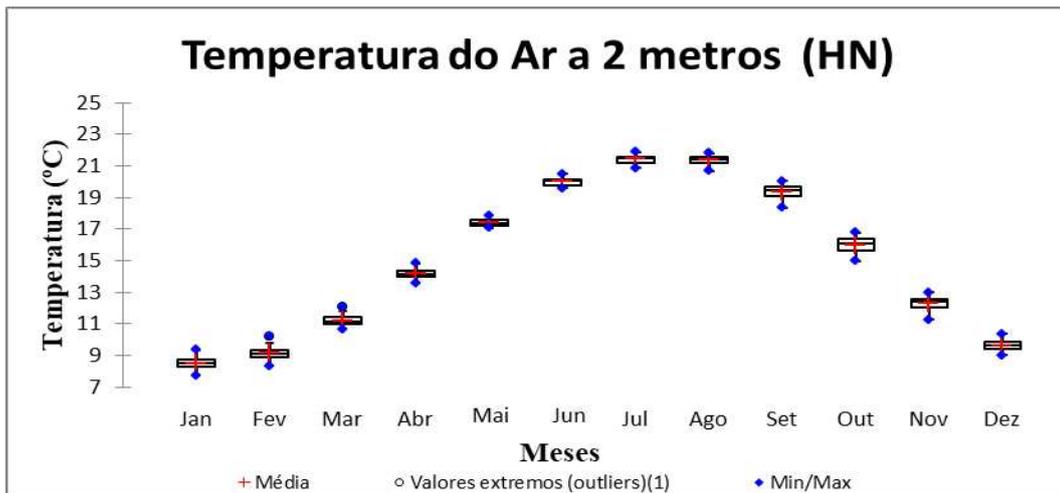
No HN, a figura 5 (b) apresenta em todos os meses valores bem concentrados em torno da média, com pouca discrepância. O mês com maior dispersão foi outubro, com valores médios em torno de $14^{\circ}C$, e os meses com menores dispersões foram junho, julho e agosto, com valores médios em torno de $11^{\circ}C$. Essa variabilidade maior entre esses meses mostra a interferência do período de verão e inverno para o HN.

Para os HS figura 5 (c) há um padrão inverso comparado com a figura para o HN. Os valores encontram-se bem concentrados em torno da média, sendo o mês de junho com maior discrepância entre os dados ao passo que nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, os dados se concentram em torno de 17°C, quando são observados os maiores valores de temperatura do ar, coincidentes com o período de verão para o hemisfério Sul. A diferença na temperatura média entre o hemisfério norte e o hemisfério sul é devido a uma série de fatores, incluindo a distribuição desigual de terra e água, correntes oceânicas, padrões de vento e a inclinação do eixo da Terra.

a)



b)



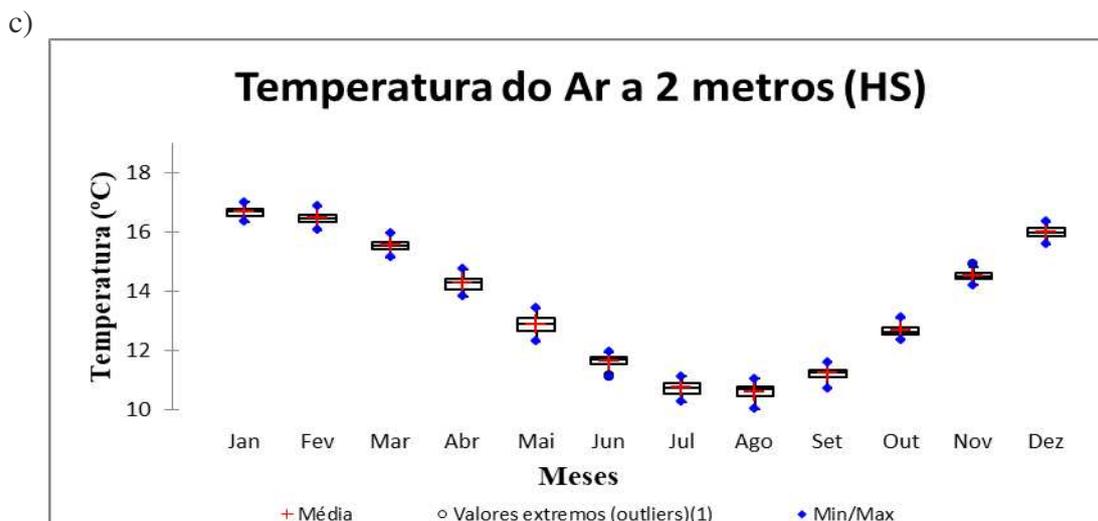


Figura 5: Temperatura do ar (°C) a 2 metros: (a) para o Globo; (b) para o HN; (c) para o HS

4.2.2 Aplicação dos Testes Estatísticos para a Temperatura do ar (°C) a 2 metros

As análises a seguir (Tabela 1) foram realizadas a partir da execução dos testes estatísticos de Dickey Fuller, Shapiro Wilck, Mann Kendall e Pettitt para o Hemisfério Norte (HN), Hemisfério Sul (HS) e para todo o Globo para a variável temperatura do ar(°C) a 2 metros.

O primeiro a ser analisado foi o teste de raiz unitária de Dickey Fuller Aumentado (Said e Dickey, 1984) com o objetivo de avaliar se as variáveis utilizadas seguem um processo estocástico estacionário. Como o p-valor calculado é maior que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), não se rejeita a hipótese nula H_0 , para os três casos o HN, HS e Globo, ou seja, há uma raiz unitária para as 3 séries e elas são não estacionárias, ($p\text{-valor} > \alpha$). Isto significa que, se as séries seguem um padrão não estacionário, podendo, portanto, ser aplicados os testes de Mann-Kendall e Pettitt.

Foi aplicado o segundo teste: o teste de Shapiro-Wilk, para verificar se as três séries temporais seguem uma distribuição normal, para as três séries de dados, correspondentes ao HN, HS e Globo. Como os valores de p-valor foram todos maiores que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), não se rejeita a hipótese nula H_0 para as 3 séries, portanto, todas seguem uma distribuição normal.

O terceiro teste aplicado foi Mann-Kendall. O Teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) é um método não paramétrico utilizado para determinar se a série de dados possui uma tendência temporal estatisticamente significativa. Por tratar-se de um método não paramétrico, ele não requer que os dados sigam uma distribuição normal (Yue *et al.*, 2002).

Outra vantagem deste método é o fato de ser pouco influenciado por mudanças abruptas ou séries não homogêneas (Zhang *et al.*, 2009). Para a variável observada, como o p-valor calculado é menor que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), deve-se rejeitar a hipótese nula H_0 em favor da hipótese alternativa H_a , nas 3 séries de dados para HN, HS e Globo, apresentando, portanto, uma tendência temporal em cada uma delas. A autocorrelação foi obtida usando o método de Hamed and Rao (Hamed e Rao, 1998). O risco de rejeitar a hipótese nula H_0 quando ela é verdadeira é menor do que 0,01%.

A análise de tendência em séries históricas também pode ser realizada através do teste de Pettitt (Pettitt, 1979) sendo um dos mais utilizados na literatura. Por ser não paramétrico permite confirmar a estacionariedade da série histórica, ou seja, excetuando as flutuações aleatórias, atentando-se para valores de saltos na série, exatamente quando há uma mudança nos valores temporais da variável analisada.

Para observar mudanças abruptas na série, foi utilizado o método de Pettitt (Pettitt, 1979). Esse parâmetro também pode indicar se duas amostras oriundas da mesma série temporal podem ser consideradas da mesma população. Como o p-valor calculado é menor que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), deve-se rejeitar a hipótese nula H_0 em favor da hipótese alternativa H_a . Portanto, os valores na tabela correspondem as datas em que houve alteração nos dados, sendo o ano 2001 para o Globo e para o HS e 2002 para o HN. Essas mudanças abruptas apontam aumento dos valores de temperatura, relacionado a uma tendência positiva na série, podendo estar relacionada à variabilidade interanual de temperatura durante os 30 anos de dados observados na série.

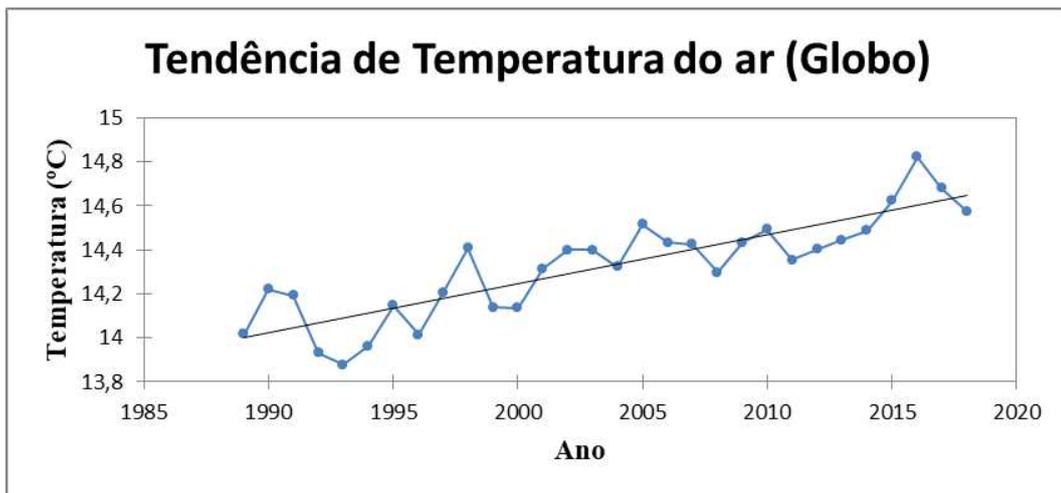
Tabela 1: Testes estatísticos para a variável temperatura do ar (°C) a 2 metros

Método	Parâmetros	Globo	HN	HS
ADF- Dickey Fuller	τ (observado)	-3,1501	-3,0693	-2,9484
	τ (crítico)	-0,5994	-0,5994	-0,5076
	p-valor	0,1025	0,1182	0,1508
Shapiro-Wilk	W	0,9769	0,9770	0,9635
	p-valor	0,7401	0,7430	0,3803
Mann - Kendall	τ	0,6781	0,6919	0,6275
	S	295,00	301,00	273,00
	Var(s)	3141,6	3141,6	3141,6

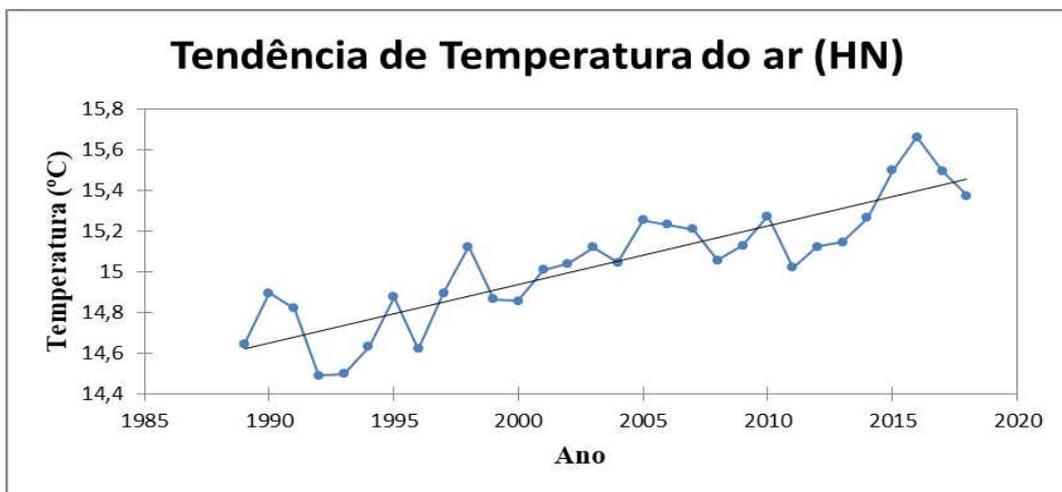
	p-Valor	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
	Inclinação (°C/ano)	0,0229	0,0290	0,0155
Pettitt	K	207,00	214,00	199,00
	T	2001	2002	2001
	p-Valor	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

Nas figuras 6 foram apresentadas as tendências nas séries temporais de temperatura do ar de acordo com valores médios anuais, para o HN, HS e Globo. Há uma inclinação na série de dados apontando uma tendência de valores positivos de temperatura, sendo também comprovado pelo cálculo de inclinação na linha de tendência pelo método de regressão linear.

a)



b)



c)

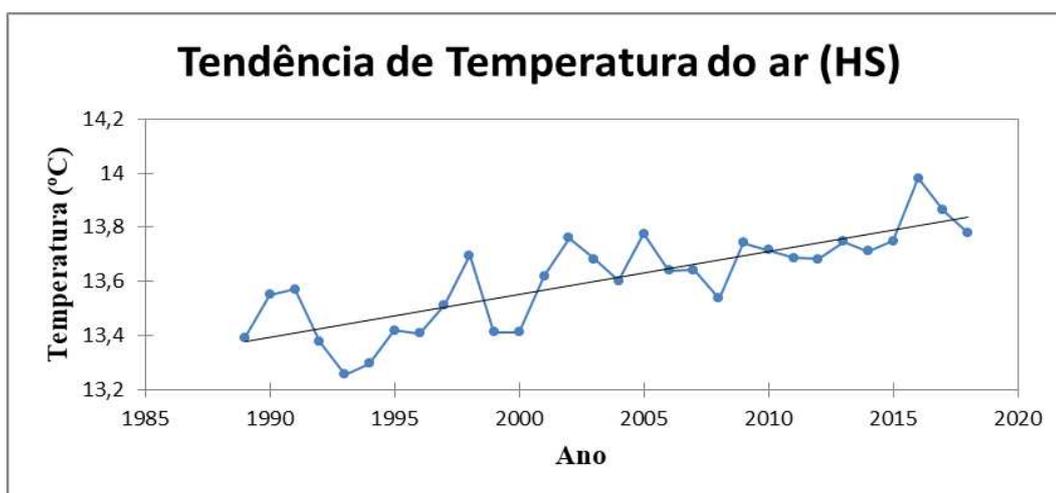


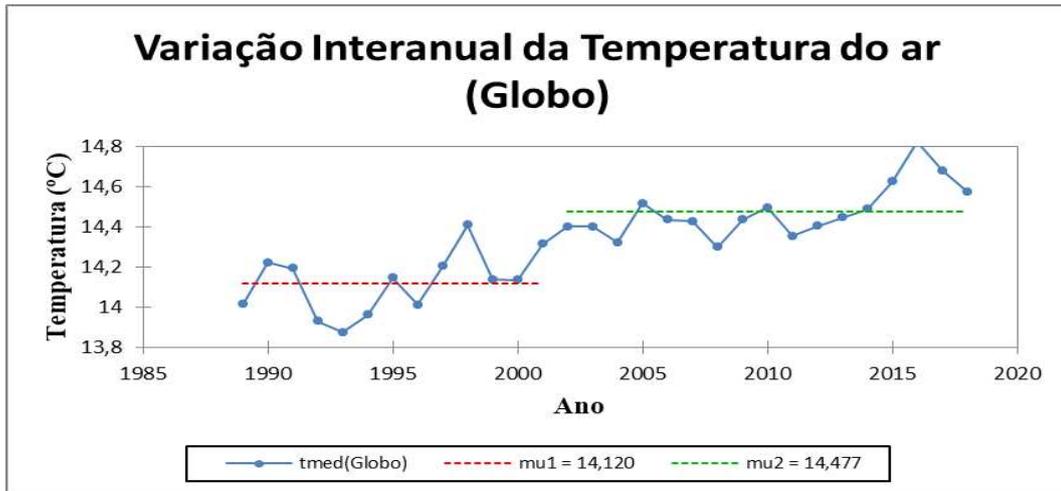
Figura 6: Temperatura do ar (°C) a 2 metros: (a) para o Globo; (b) para o HN; (c) para o HS

Para observar mudanças abruptas na série, foi utilizado o método de Pettitt (Pettitt, 1979). Na figura 7(a) observa-se a variação interanual da variável temperatura do ar (a 2 m) para todo o globo. Há uma separação observada no teste de Pettitt, resultando em mudanças abruptas nas séries analisadas. A linha horizontal em vermelho vai desde 1989 a 2001 apresentando valores médios em torno de 14°C e a linha em verde apresenta outra parte da série com valores que vão desde 2002 a 2018, com valores médios em torno de 14,5 °C, ressaltando aumento de 0,5 °C.

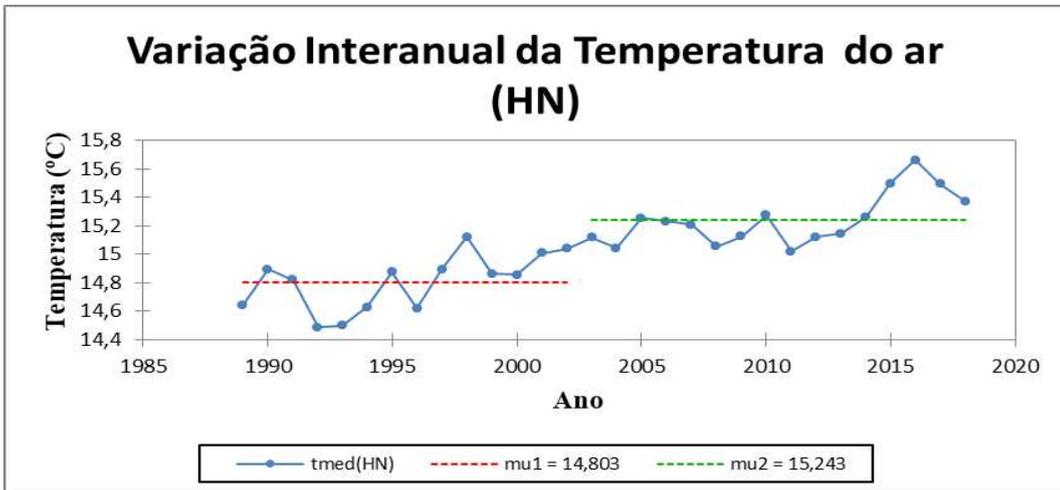
A Figura 7(b) mostra a variabilidade interanual da variável temperatura para o HN, apresentando uma divisão na série total de dados, da qual a linha em vermelho vai de 1989 a 2002, com valores médios em torno de 14,8 °C, e outra linha em verde desde 2003 até 2018, com valores médios de 15,2 °C (aumento de 0,4°C). Para o HN observa-se uma tendência positiva, que pode estar relacionada ao aumento da temperatura devido às mudanças climáticas no planeta.

A Figura 7(c) apresenta a variabilidade interanual da variável temperatura do ar para o HS. Há novamente uma divisão na série de dados totais, apresentando uma linha vermelha com valores em torno de 13,4 °C desde o ano de 1989 até 2001. Outra linha verde é observada fazendo uma “quebra” da série de dados, apontando uma tendência positiva, com valores que oscilam em torno de 13,7 °C (aumento de 0,3 °C), iniciando desde o ano de 2002 até o ano final de 2018. Também é notável tendência positiva possivelmente relacionada ao aumento de temperatura do ar que pode estar associado às mudanças climáticas do planeta.

a)



b)



c)

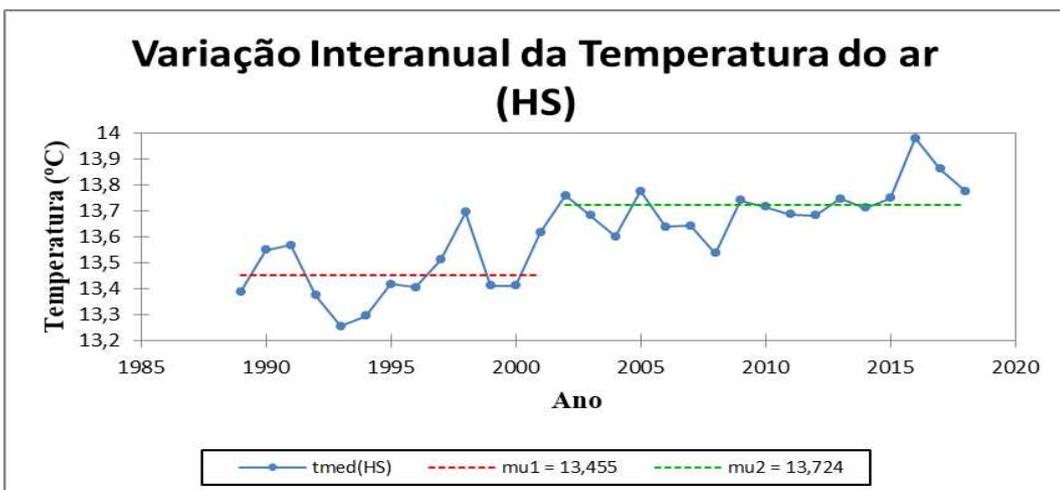
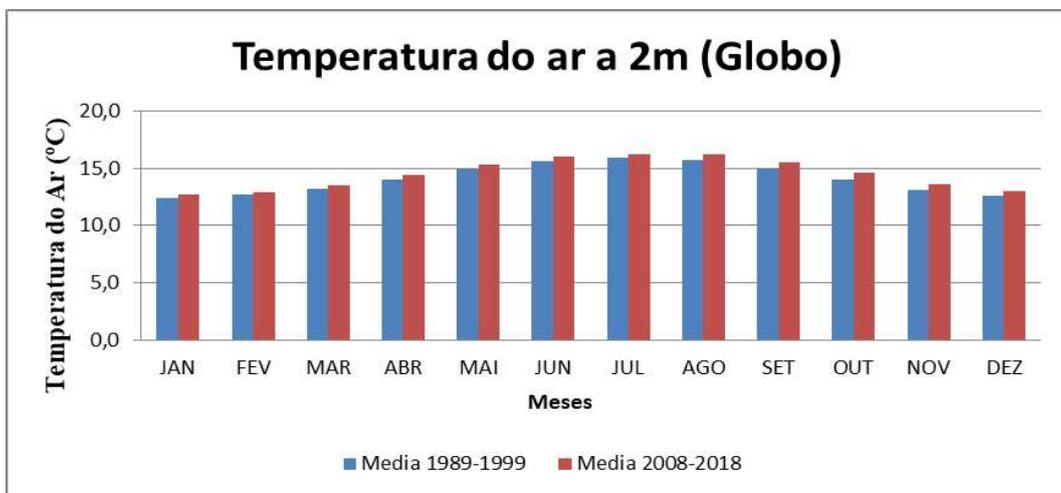


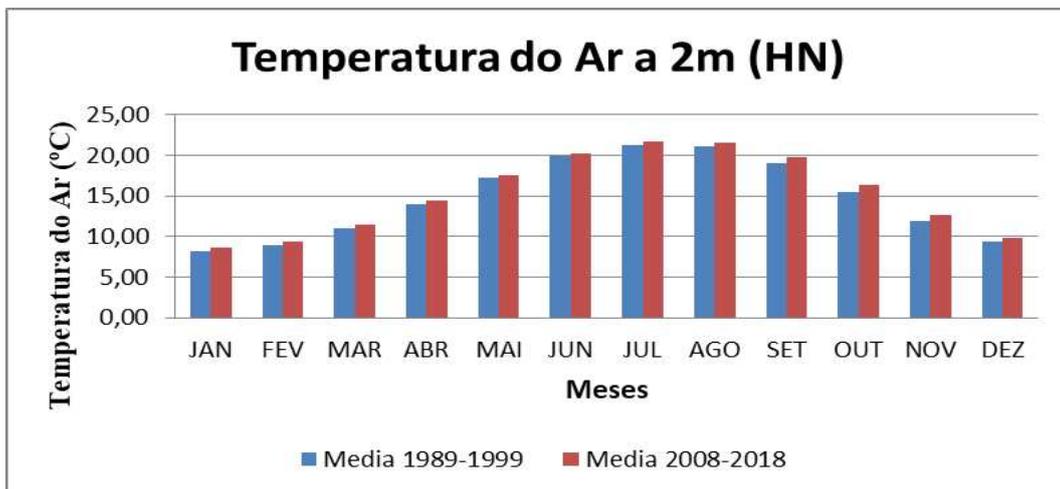
Figura 7: Variação interanual da temperatura do ar (°C) a 2 metros: (a) para o Globo; (b) para o HN; (c) para o HS (teste de Pettitt)

As Figuras 8 (a, b e c) foram comparadas com as séries das figuras 7, calculando um valor médio mensal de 10 anos iniciais de dados da série (de 1989 a 1999) comparados com a média dos 10 anos finais (de 2008 a 2018) para mostrar a diferença de valores e aumento de temperatura do ar, tanto para o HN, HS e Globo. É notável um aumento nos valores médios das séries (1989 até 1999) comparado com a outra série de dados (de 2008 a 2018). A escolha dessas séries (anos iniciais e anos finais) foi feita dessa forma para apresentar uma percepção mais clara no aumento dos valores de temperatura do ar ao longo dos meses/ anos.

a)



b)



c)

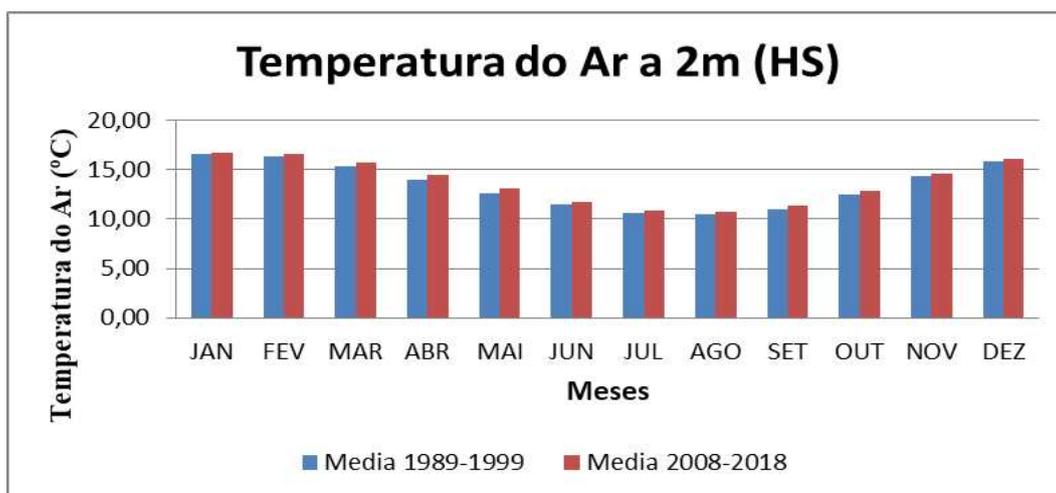


Figura 8: Variação sazonal da temperatura do ar (°C): (a) para o Globo; (b) para o HN e (c) para o HS. Comparação de duas décadas distintas: anos iniciais (de 1989 a 1999) e anos finais de (2008 a 2018).

4.3 ANÁLISE DA VARIÁVEL ÁGUA PRECIPITÁVEL (NCEP/NCAR)

4.3.1 Variação Mensal da Água Precipitável (mm)

Foram plotados os valores médios globais de água precipitável (mm) para cada mês em formato box-plot, no período de janeiro de 1986 a dezembro de 2016, obtidos a partir das reanálises do NCEP/NCAR. Na Figura 9-a observam-se os valores médios mensais globais. Os meses com menor dispersão foram março e abril; os meses com maiores dispersões foram junho e julho, apresentando maior variabilidade de valores para água precipitável. Pode haver alguns valores atípicos, porém o mês com o maior valor de água precipitável mensal de toda a série encontra-se em julho (25,6 mm). Os valores máximos globais encontram-se entre os meses de julho e agosto enquanto os valores mais baixos oscilam de dezembro a janeiro. A média global de água precipitável tem cerca de 24,1 mm.

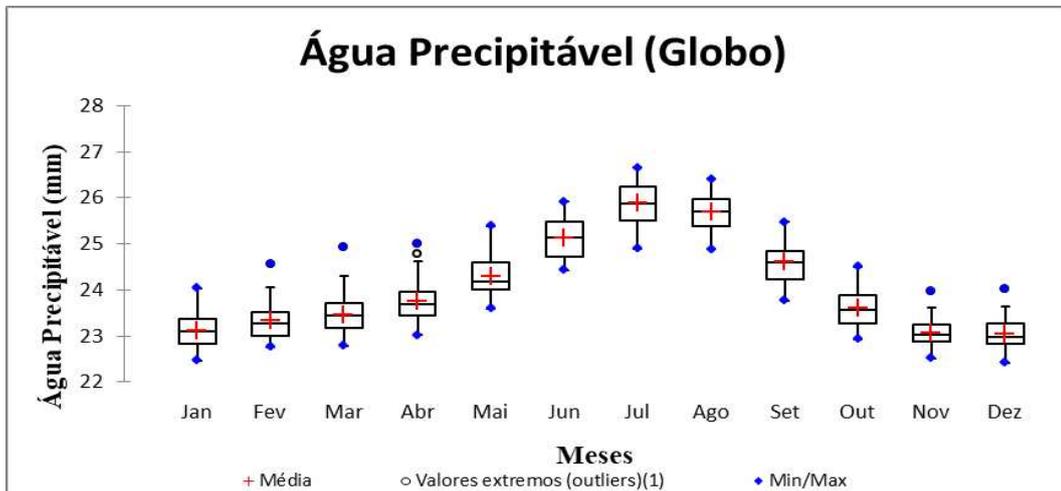
Para o HN (Figura 9-b), os valores de AP obtiveram menor dispersão entre os meses de dezembro e fevereiro com pouca variabilidade, no período de inverno no HN onde há uma redução de AP e diminuição de evaporação. Já os meses com maiores dispersões encontram-se entre junho e setembro, com maior variabilidade devido a uma maior evaporação correspondente ao verão no HN, com valores de AP mensal máximos de 33 mm.

Para o HS (figura 9-c), os valores mensais de água precipitável apresentam-se em geral com pouca dispersão e pouca variabilidade de dados. Os menores valores apresentam-se entre

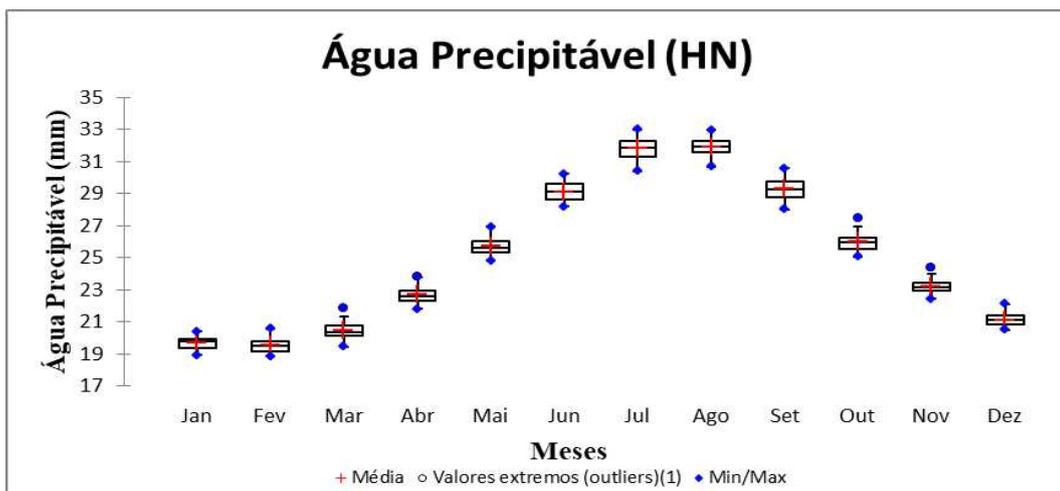
os meses de julho a setembro, com pouca variabilidade de dados, relacionado ao inverno no HS. Já os meses com maior dispersão, mesmo que seja pouca, apresentam-se entre dezembro, janeiro e fevereiro. Os valores máximos encontram-se em torno de 30 mm para os meses de verão, e os mínimos valores de AP encontram-se em torno de 20 mm.

O HN apresenta-se com uma maior variabilidade entre os dados comparados aos dados de AP para o HS. Embora no HS exista uma maior área de águas oceânicas, pode-se observar que os maiores valores da AP são para o HN, pelo fato de que esse efeito provavelmente seja obtido pelo maior aquecimento da atmosfera produzida pela disponibilidade de energia solar pois o HN possui uma cobertura continental maior que o HS. Portanto, o teor de vapor de água na atmosfera do HN é associado a maior variabilidade de temperatura do ar.

a)



b)



c)

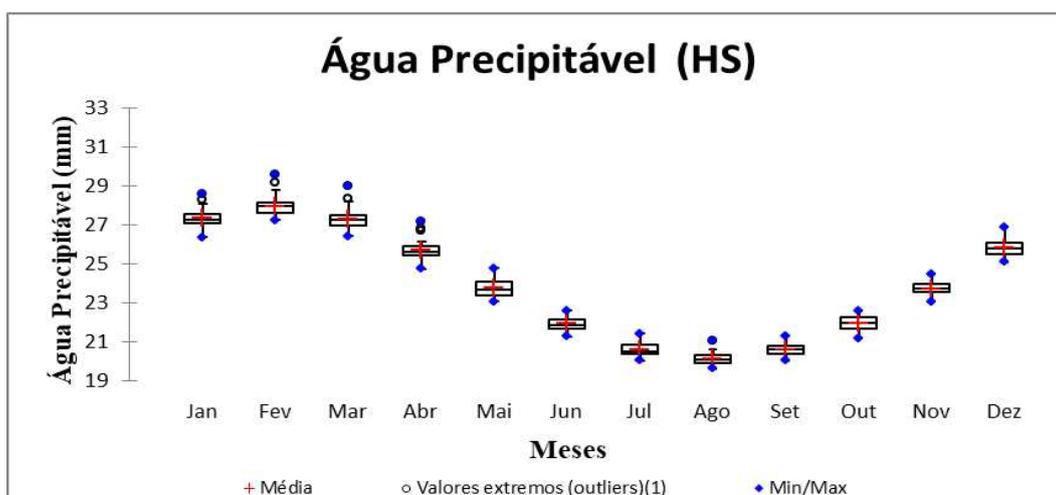


Figura 9: Água precipitável (mm): (a) para o Globo; (b) para o HN; (c) para o HS (médias mensais de 1989 a 2018).

4.3.2 Aplicação dos testes estatísticos para a água precipitável (mm)

Inicialmente foi feito o teste de raiz unitária de Dickey Fuller aumentado (Said e Dick, 1984) para avaliar se a variável água precipitável segue um processo estocástico estacionário. Para o HN, HS e para o Globo (Tabela 2) como o p-valor calculado é maior que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), não se rejeita a hipótese nula H_0 , portanto há uma raiz unitária para a série, detectando que a série é não estacionária.

Em seguida, verificou-se a normalidade das 3 séries, para o HN, HS e Globo através do teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965). Observando os valores na Tabela 2, como o p-valor calculado é maior que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), não se rejeita a hipótese nula H_0 , as amostras das 3 séries (HN, HS e Globo) seguem uma distribuição normal.

Utilizou-se o teste de Mann Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) para determinar se a série de dados possui uma tendência temporal de alteração estatisticamente significativa. Na tabela 2 pode-se observar que as três séries apresentam tendência positiva em seus dados de água precipitável. Como o p-valor calculado é menor que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), deve-se rejeitar a hipótese nula H_0 em favor da hipótese alternativa H_a . Significa que para as três séries (HN, HS e Globo) há uma tendência positiva. O risco de rejeição da hipótese nula compreende um percentual menor que 0,02%.

O HN há uma tendência de 0,0443 mm/ano, o HS apresenta uma tendência de 0,0259 mm/ano e o Globo apresenta a tendência de 0,0331 mm/ano. A correlação (τ de Kendall)

apresentada é de 0,6 para o HN, de 0,4758 para o HS e de 0,5816 para o Globo. Os valores para o HN são mais efetivos devido ao fato que há uma maior variação sazonal de temperatura e de água precipitável, assim como pode ser justificada pela menor quantidade dos dados no HS.

A análise de tendência em séries foi também feita pelo teste de Pettitt (Pettitt, 1979) para observar mudanças abruptas na série. Esse parâmetro também pode indicar se duas amostras oriundas da mesma série temporal podem ser consideradas da mesma população. Como o p-valor calculado é menor que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), deve-se rejeitar a hipótese nula H_0 em favor da hipótese alternativa. Há, ou seja, há uma data em que houve alteração nas séries de dados.

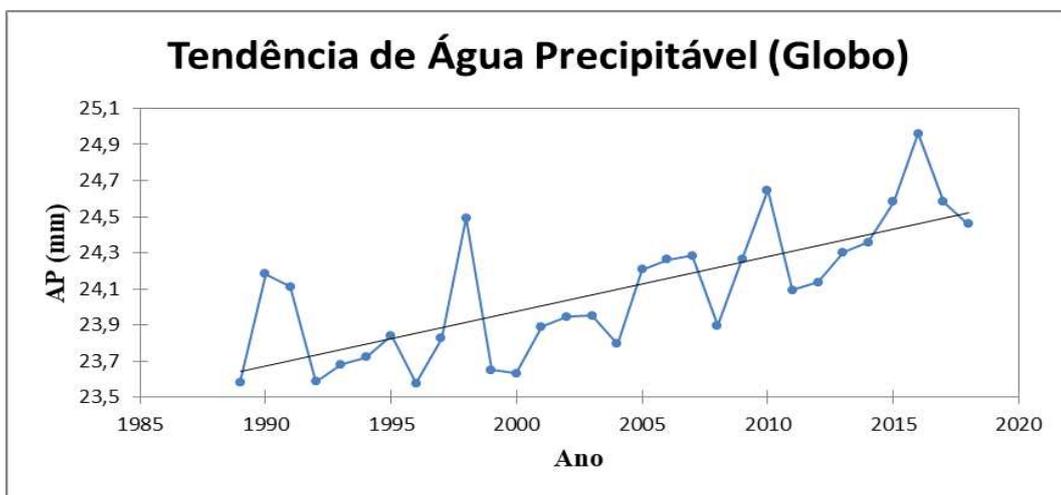
Os valores na tabela correspondem às datas em que houve alteração nos dados, sendo estas no ano de 2004 detectadas para o Globo, HN e HS. Essas mudanças abruptas apontam aumento dos valores de água precipitável, relacionado a uma tendência positiva na série, podendo estar relacionada à variabilidade interanual de temperatura durante os 30 anos de dados observados na série.

Tabela 2: Testes estatísticos para a variável água precipitável (mm)

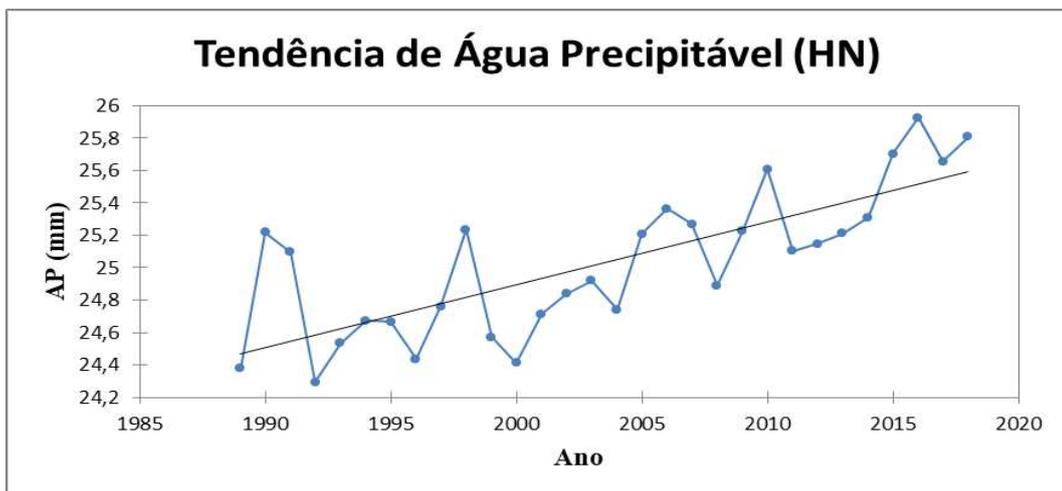
Método	Parâmetros	Globo	HN	HS
ADF	τ (observado)	-3,4731	-2,9651	-3,5096
	τ (crítico)	-0,5994	-0,5994	-0,5994
	p-valor	0,0543	0,1420	0,0508
Shapiro-Wilck	W	0,9562	0,9646	0,9451
	p-valor	0,2479	0,4058	0,1251
Mann - Kendall	τ	0,5816	0,6000	0,4758
	S	253,00	261,00	207,00
	Var(s)	3141,6	3141,6	3141,6
	p-Valor	< 0,0001	< 0,0001	0,000237
	Inclinação (mm/ano)	0,0331	0,0443	0,0259
Pettit	K	190,00	198,00	176,00
	T	2004	2004	2004
	p-Valor	< 0,0001	< 0,0001	0,0002

Nas Figuras 10 (a, b e c) foram apresentadas as tendências nas séries temporais de água precipitável (mm) de acordo com valores médios anuais, para o HN, HS e Globo. Há uma inclinação na série de dados apontando uma tendência de valores positivos de água precipitável (para o Globo, HN e HS) sendo também comprovado pelo cálculo de inclinação na linha de tendência pelo método de regressão linear. Há alguns picos nas séries que podem estar ligados a variabilidade interanual, apresentando maiores e menores valores em anos de El Niño e La Niña.

a)



b)



c)

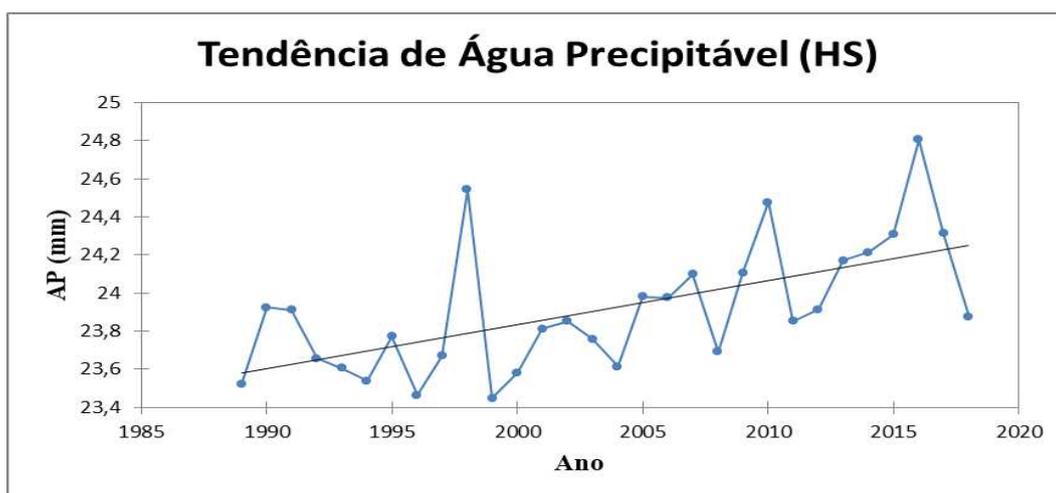


Figura 10: Tendência da água precipitável (mm): (a) para o Globo; (b) para o HN; (c) para o HS (de 1989 a 2018).

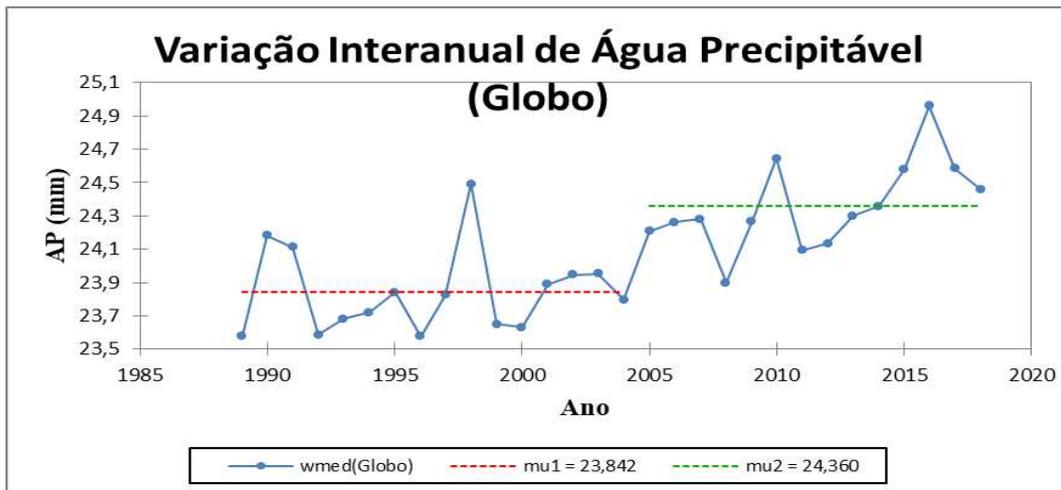
Como observado pelo teste de Pettitt (Pettitt, 1979) o método permite perceber mudanças abruptas nas séries temporais apontando tendências positivas.

Na Figura 11-a observa-se a variação interanual de água precipitável para o globo no período de 1989 a 2018. As linhas horizontais pontilhadas nas cores em vermelho e verde representam uma divisão na série de dados em dois períodos distintos, mostrando que houve uma mudança abrupta na média de AP para o período. Antes de 2004, a série temporal de AP apresenta-se com uma média em torno de 23,79 mm e após 2004, apresenta um aumento em torno de 0,56 mm, observando-se uma média de 24,36 mm.

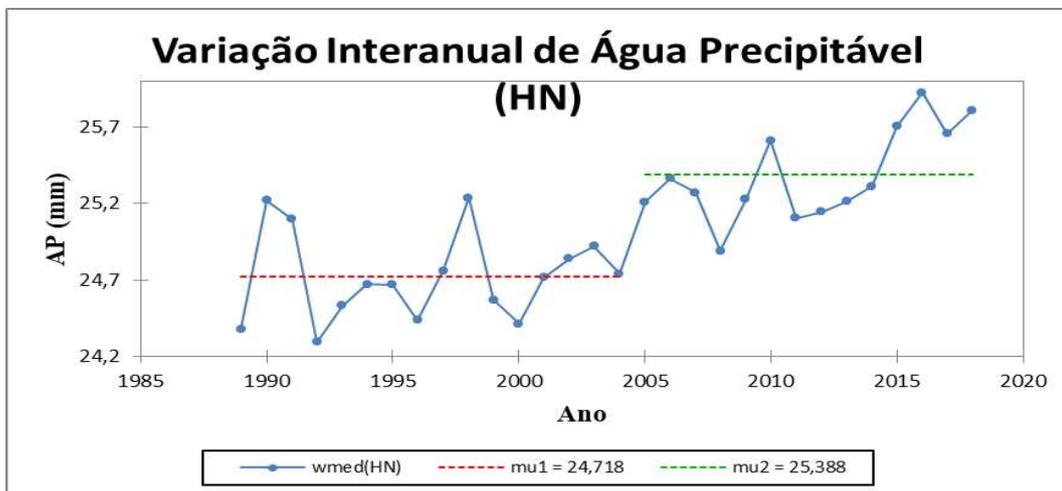
Na Figura 11-b que representa a variação interanual de água precipitável para o HN, usando o mesmo procedimento mostra também que houve uma mudança na média no período em estudo, dividindo a série em dois períodos distintos, antes de 2004 apresentando uma média de 24,71 mm e depois de 2004 (linha verde) apresentando valores médios de 25,38 mm, com um aumento significativo de 0,67 mm.

Para o HS (Figura 11-c) apresenta uma divisão da série de dados em 2 períodos, antes de 2004, apresentando valores médios em torno de 23,72 mm e depois de 2004 (linha verde) apresentando valores médios de 24,10 mm com aumento de 0,38 mm. Neste caso o HS obteve um menor aumento devido ao fato de o hemisfério ter uma maior extensão em área oceânica do que continental, agindo desta forma como regulador térmico havendo, portanto, pouca variação de água precipitável ao longo dos anos. Em todas as figuras observa-se um aumento ao longo dos anos.

a)



b)



c)

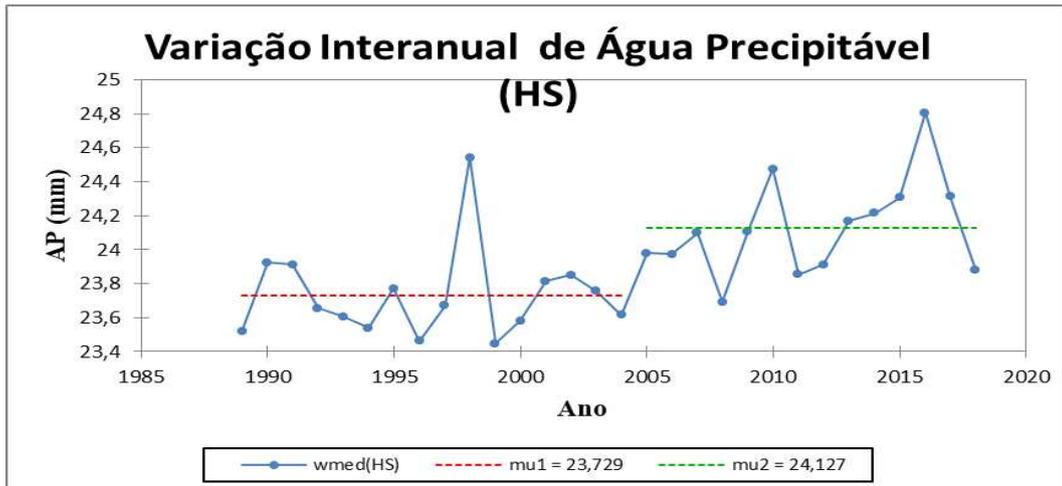
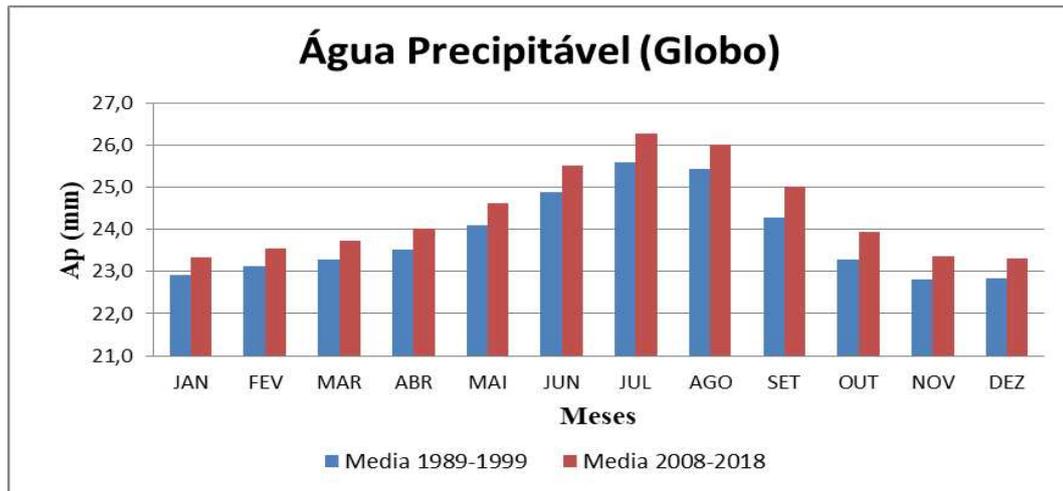


Figura 11: Varição interanual da água precipitável (mm): (a) para o Globo; (b) para o HN; (c) para o HS (de 1989 a 2018 pelo método de Pettitt).

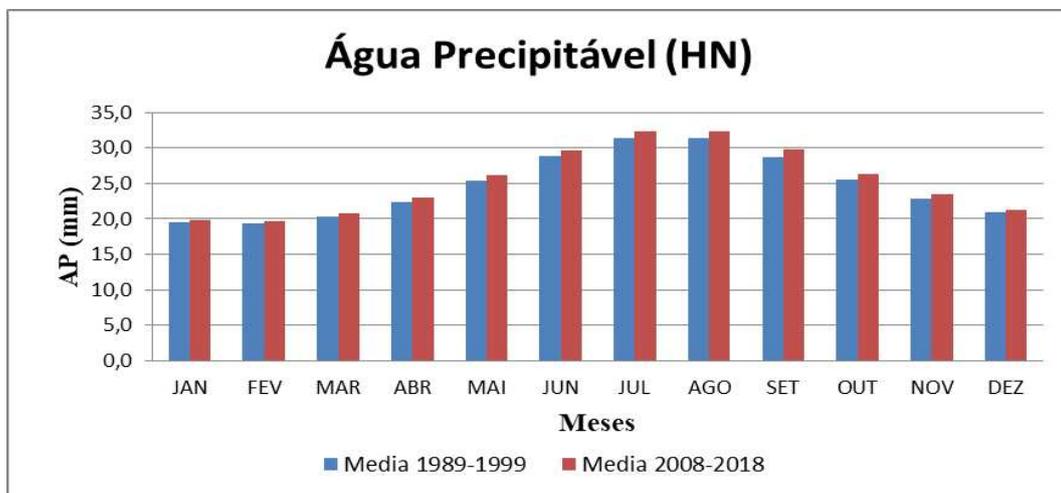
Nas Figuras 12 (a, b e c) foram feitas calculando um valor médio mensal de 10 anos iniciais de dados da série (de 1989 a 1999) comparados com a média mensal dos 10 anos finais

(de 2008 a 2018) para mostrar a diferença de valores e aumento de água precipitável (mm), tanto para o HN, HS e Globo. Há um aumento nos valores médios em todas as séries (Globo, HN e HS). A escolha dessas séries (anos iniciais e anos finais) foi feita dessa forma para apresentar uma percepção mais clara no aumento dos valores de água precipitável ao longo dos meses/ anos.

a)



b)



c)

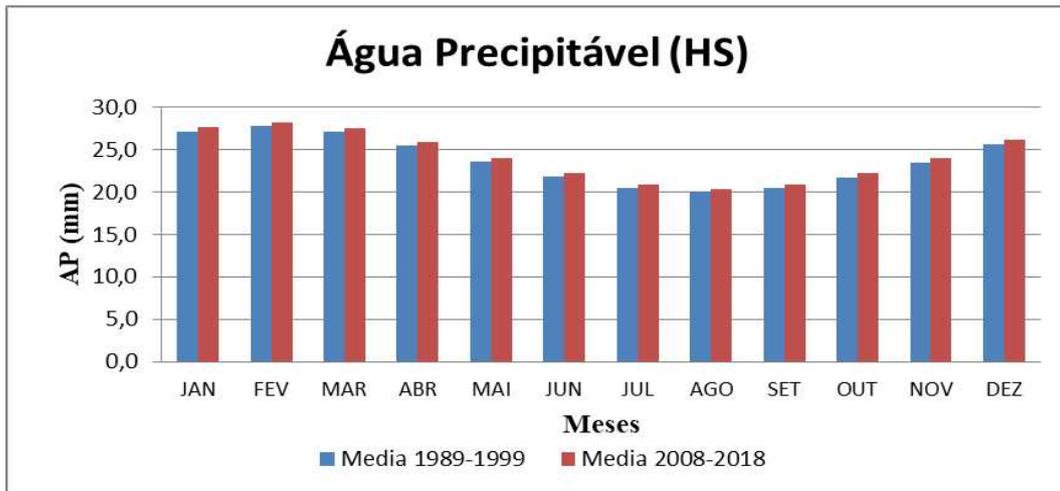


Figura 12: Variação sazonal da água precipitável (mm): (a) para o Globo; (b) para o HN e (c) para o HS. Comparação de duas décadas distintas: anos iniciais (de 1989 a 1999) e anos finais de (2008 a 2018).

4.4 ANÁLISE DA RADIAÇÃO DE ONDA LONGA EMITIDA PELA SUPERFÍCIE – (NCEP/NCAR)

4.4.1 Variação Mensal da Radiação de Onda Longa Emitida Pela Superfície (ROL_S)

As análises a seguir são feitas para os gráficos de radiação de onda longa emitida pela superfície terrestre, no período de janeiro de 1989 a dezembro de 2018 obtidos a partir dos dados de reanálises do NCEP/NCAR.

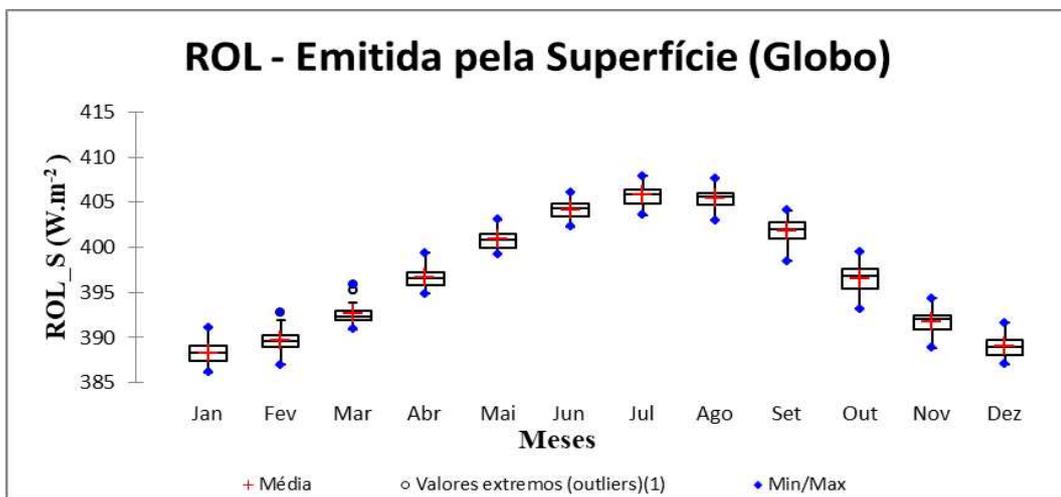
A Figura 13-a, apresenta as médias mensais globais de radiação de onda longa emitida pela superfície. Os meses que tiveram maiores dispersões foram os meses de setembro e outubro. Já os meses com menores dispersões foram o período entre os meses de fevereiro e março, e entre os meses de junho, julho e agosto. O mês de março possui um valor atípico (outlier) na série, mas isto não interfere nos resultados. Os maiores valores de ROL_S encontram-se no mês de julho (408 W.m^{-2}) enquanto os valores mais baixos encontram-se entre dezembro e janeiro (em torno de 385 W.m^{-2}). A média encontra-se em torno de 396 W.m^{-2} corroborando com os valores médios globais encontrados na literatura (400 W.m^{-2})

No HN (Figura 13-b) todos os meses apresentam valores bem concentrados em torno da média, com pouca discrepância. O mês com maior dispersão foi outubro, com valores médios em torno de $405,3 \text{ W.m}^{-2}$, e os meses com menores dispersões foram o período de março a agosto. Os maiores valores encontram-se entre julho e agosto, com valores médios de $430,5$

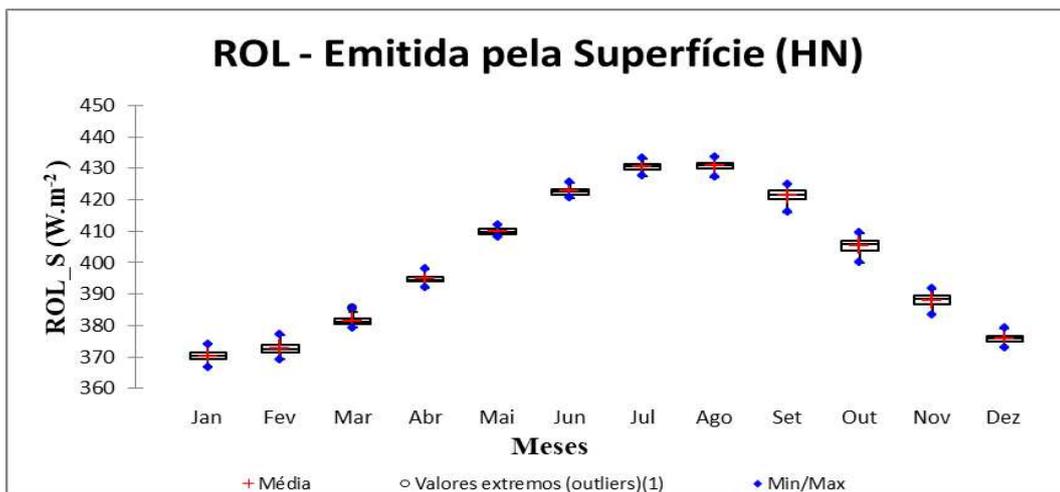
W.m^{-2} e $430,8 \text{ W.m}^{-2}$ respectivamente, coincidindo com o período de verão no HN. Já os menores valores ocorrem durante o período de inverno, entre os meses de dezembro ($375,86 \text{ W.m}^{-2}$), janeiro ($370,37 \text{ W.m}^{-2}$) e fevereiro ($372,77 \text{ W.m}^{-2}$).

Para os HS (Figura 13-c) há um padrão inverso comparado com figura 13-b para o HN. Os valores encontram-se bem concentrados em torno da média, sendo maio, o mês com maior discrepância, ao passo que nos meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro obtiveram menores discrepância. Os maiores valores ocorrem no período de verão entre os meses de dezembro ($402,16 \text{ W.m}^{-2}$), janeiro ($406,25 \text{ W.m}^{-2}$) e fevereiro ($406,5 \text{ W.m}^{-2}$).

a)



b)



c)

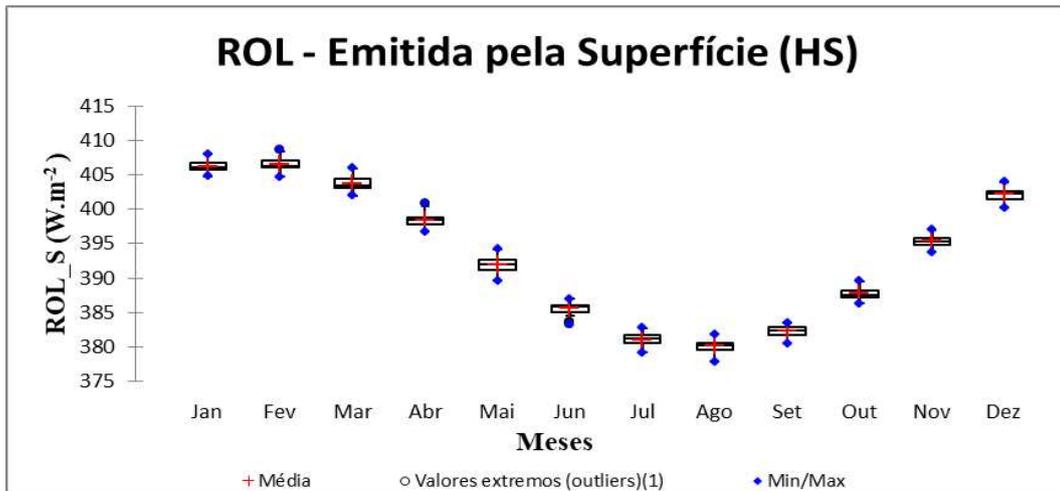


Figura 13: Radiação de onda longa emitida pela superfície ($W.m^{-2}$): (a) para o Globo; (b) para o HN; (c) para o HS

4.4.2 Análise estatística da radiação de onda longa emitida pela superfície ($W.m^{-2}$)

Nas análises a seguir (Tabela 3) foram realizados os testes estatísticos de Dickey Fuller, Shapiro Wilck, Mann Kendall e Pettitt para o Hemisfério Norte (HN), Hemisfério Sul (HS) e para todo o Globo para a variável Radiação de onda longa emitida pela superfície ($W.m^{-2}$) para as médias anuais desde 1989 até 2018.

Para avaliar se as variáveis seguem um processo estocástico estacionário, utilizou-se inicialmente o teste de raiz unitária de Dickey Fuller Aumentado (Said e Dickey, 1984). Como o p-valor calculado é maior que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), não rejeita-se a hipótese nula H_0 , para os três casos o HN, HS e Globo, ou seja, há uma raiz unitária para as 3 séries e elas são não estacionárias, (p-valor $> \alpha$). O risco de rejeitar a hipótese nula H_0 foi de 15,06% para o HN, de 12,49% para o HS e de 18,48% para o Globo.

Em seguida, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk, para verificar se as três séries temporais seguem uma distribuição normal, correspondentes ao HN, HS e Globo. Como os p-valor foram todos maiores que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), não se rejeita a hipótese nula H_0 para as 3 séries, portanto, todas seguem uma distribuição normal.

O terceiro teste aplicado foi Mann – Kendall para verificar se há uma tendência positiva nas séries de dados para o HN, HS e Globo. Para a variável observada, como o p-valor calculado é menor que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), deve-se rejeitar a hipótese nula H_0 em favor da hipótese alternativa H_a , nas 3 séries de dados para HN, HS e Globo, apresentando, portanto, uma tendência de aumento positivo de radiação de onda longa emitida pela superfície, em cada

uma delas. A autocorrelação foi obtida usando o método de Hamed and Rao (Hamed e Rao, 1998). O risco de rejeitar a hipótese nula H_0 quando ela é verdadeira é menor do que 0,01%. A correlação τ de Kendell apresentou valores significativos para as 3 séries, com 0,65 para o Globo, 0,67 para o HN e 0,62 para o HS.

Para observar mudanças abruptas na série, foi utilizado o método de Pettitt (Pettitt, 1979). Como o p-valor calculado é menor que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), deve-se rejeitar a hipótese nula H_0 em favor da hipótese alternativa H_a . Portanto, os valores na tabela correspondem as datas em que houve alteração nos dados, sendo o ano 2001 para o Globo, 2002 para o HN e 2000 para o HS. Essas mudanças abruptas apontam o ano exato em que se obteve aumento dos valores de radiação de onda longa emitida pela superfície da Terra, relacionado a uma tendência positiva na série, podendo estar relacionada à variabilidade interanual de temperatura durante os 30 anos de dados observados na série.

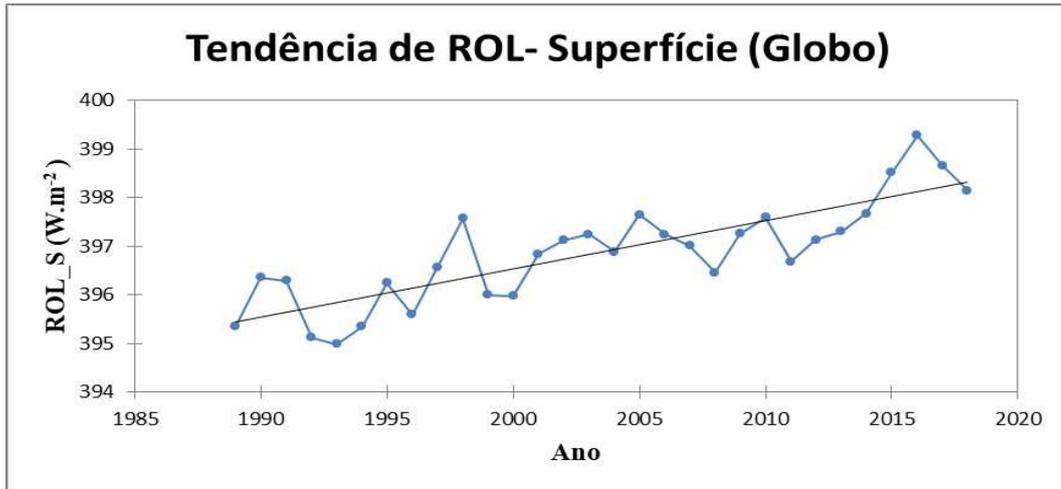
Tabela 3: Testes estatísticos para a variável radiação de onda longa emitida pela superfície ($W.m^{-2}$)

Método	Parâmetros	Globo	HN	HS
ADF	τ (observado)	-2,8081	-2,9313	-3,0372
	τ (crítico)	-0,5994	-0,5994	-0,5994
	p-valor	0,1857	0,1505	0,1254
Shapiro-Wilck	W	0,9805	0,9799	0,9803
	p-valor	0,8390	0,8230	0,8358
Mann - Kendall	τ	0,6551	0,6781	0,5172
	S	285,00	295,00	225,00
	Var(s)	3141,6	3141,6	3141,6
	p-Valor	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
	Inclinação	0,1002	0,1396	0,0593
Pettit	K	195,00	200,00	168,00
	t	2001	2002	2000
	p-Valor	< 0,0001	< 0,0001	0,0009

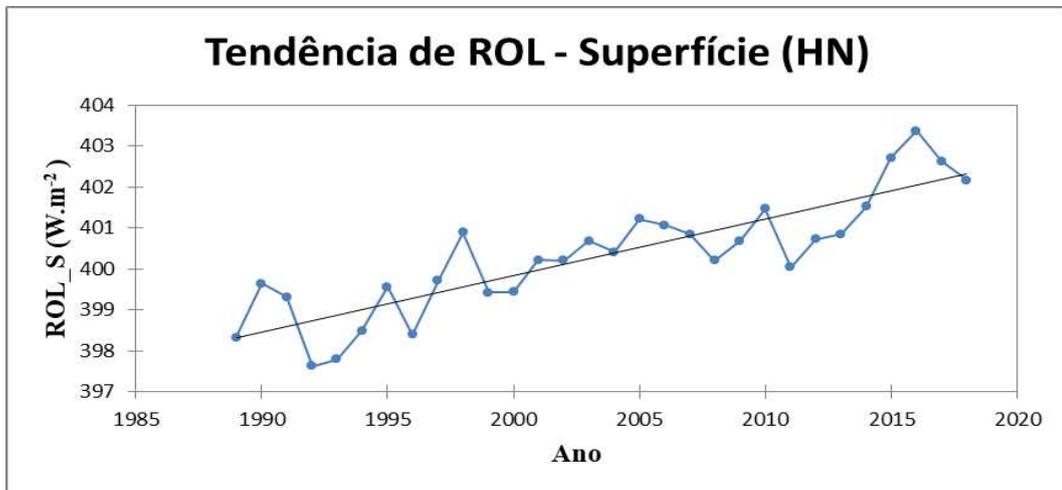
Nas figuras 14 (a, b e c) foram apresentadas as tendências nas séries temporais de ROL_S ($W.m^{-2}$) de acordo com valores médios anuais, para o HN, HS e Globo. Há uma inclinação na série de dados apontando uma tendência de valores positivos ROL_S (para o

Globo, HN e HS) sendo também comprovado pelo cálculo de inclinação na linha de tendência pelo método de regressão linear. A radiação emitida pela superfície está associada ao aumento da temperatura, pois segundo a equação de Stefan-Boltzman, um aumento nos valores de radiação de onda longa implica em aumento de temperatura na superfície, corroborando com as análises feitas anteriormente.

a)



b)



c)

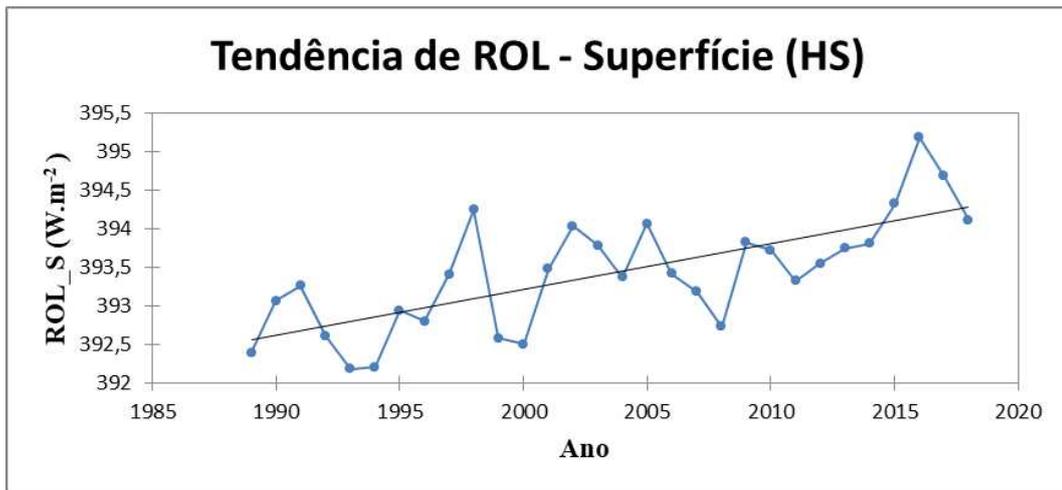


Figura 14: Tendência de radiação de onda longa emitida pela superfície (W.m^{-2}): (a) para o Globo; (b) para o HN; (c) para o HS

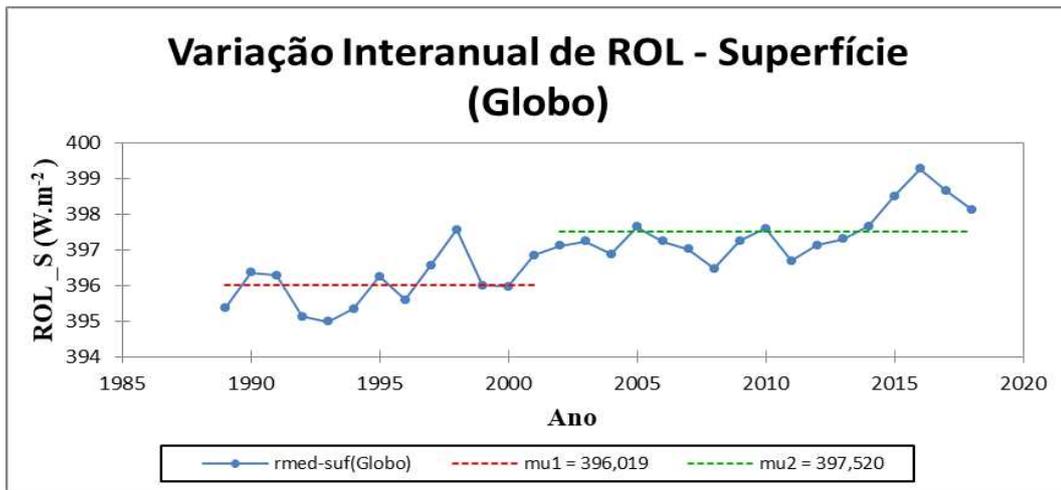
Utilizou-se o método de Pettitt (Pettitt, 1979) para observar mudanças abruptas nas séries temporais apontando tendências nas figuras abaixo.

Na Figura 15-a observa-se a variação interanual da radiação de onda longa emitida pela superfície (W.m^{-2}) para o globo no período de 1989 a 2018. As linhas horizontais pontilhadas nas cores em vermelho e verde representam uma divisão na série de dados em dois períodos distintos, mostrando que houve uma mudança abrupta na série de ROL_S. Antes de 2001, a série temporal de ROL_S apresenta-se com uma média em torno de $396,1 \text{ W.m}^{-2}$ e após 2001, apresenta um aumento, observando-se uma média de $397,5 \text{ W.m}^{-2}$.

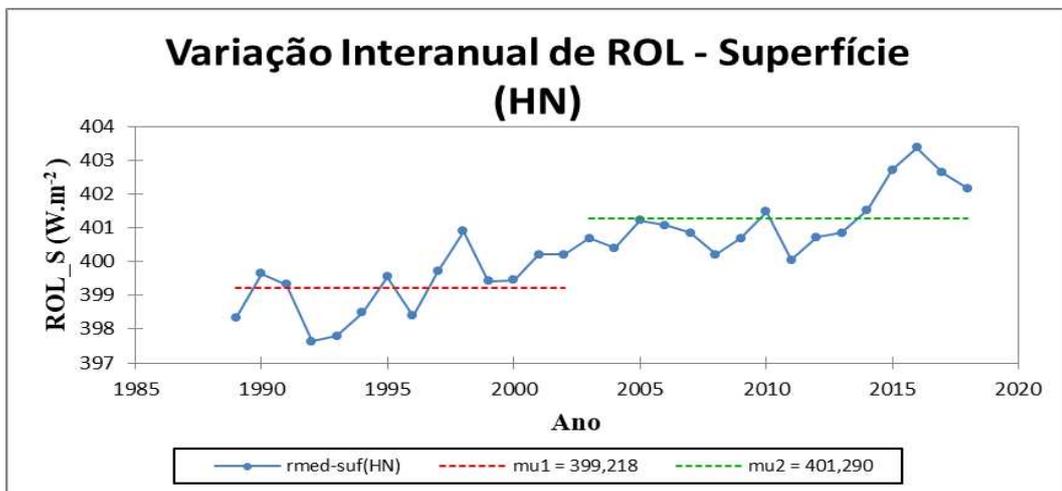
Na Figura 15-b que representa a variação interanual de ROL_S para o HN, usando o mesmo procedimento mostra também que houve uma mudança na média no período em estudo, dividindo a série em dois períodos distintos, antes de 2002 (em vermelho) apresentando uma média de $399,2 \text{ W.m}^{-2}$ e depois de 2002 (linha verde) apresentando valores médios de $401,2 \text{ W.m}^{-2}$.

Para o HS (Figura 15-c) apresenta uma divisão da série de dados em 2 períodos, antes de 2000, apresentando valores médios em torno de $392,8 \text{ W.m}^{-2}$ (em vermelho) e depois de 2000 (linha verde) apresentando valores médios de $393,7 \text{ W.m}^{-2}$. Neste caso o HS apresentou um maior aumento de ROL_S.

a)



b)



c)

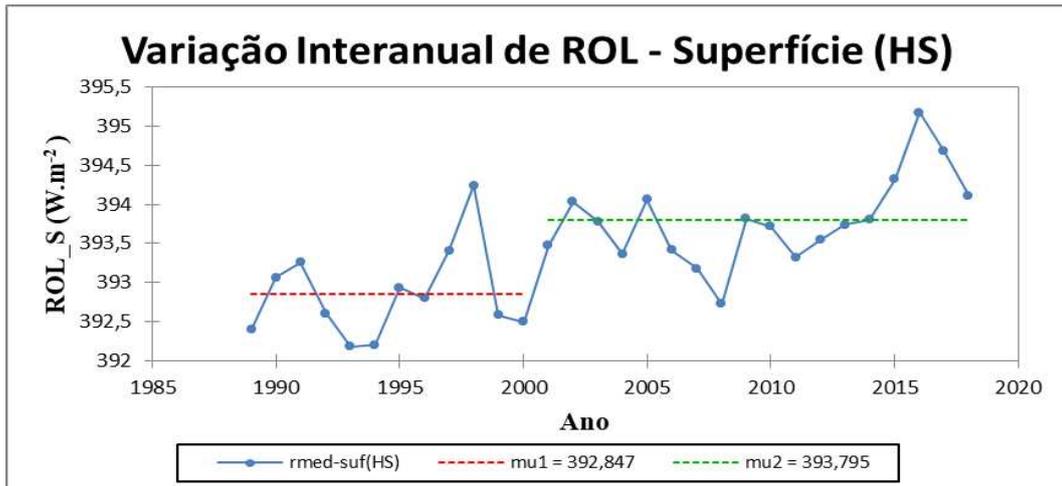
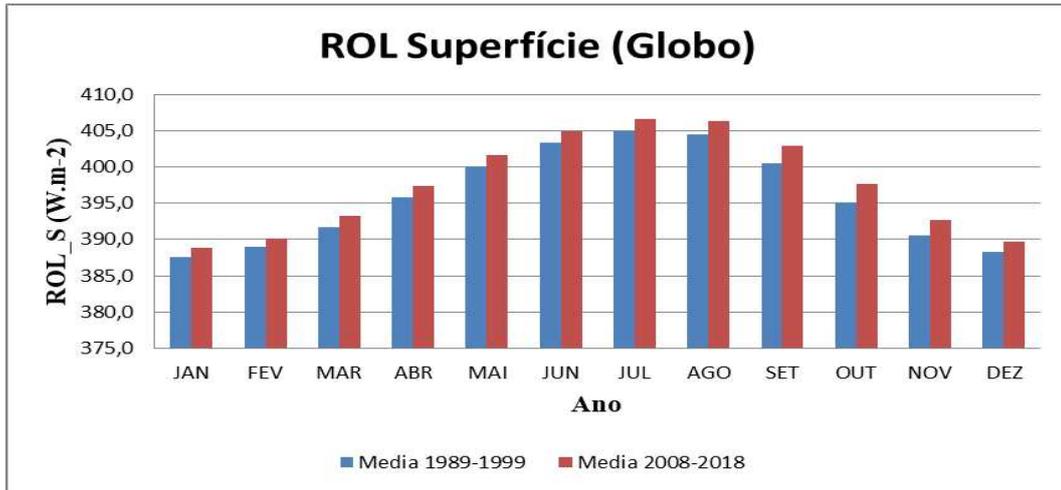


Figura 15: Varição interanual da radiação de onda longa emitida pela superfície (W.m^{-2}): (a) para o Globo; (b) para o HN e (c) para o HS. (teste de Pettitt)

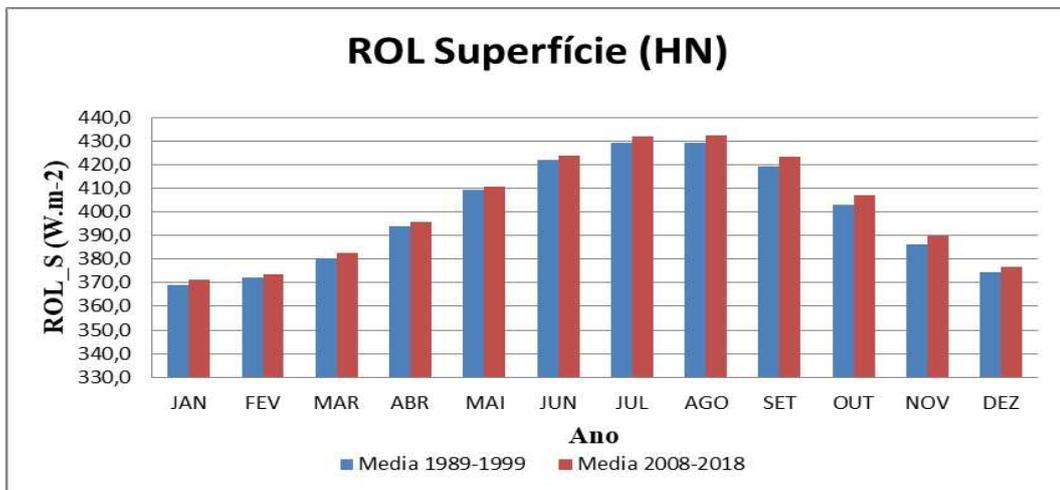
Nas Figuras 16 (a, b e c) foram feitas médias mensais de 10 anos iniciais de dados da série (de 1989 a 1999) comparados com a média mensal dos 10 anos finais (de 2008 a 2018)

para mostrar a diferença de valores e aumento de ROL_S ($W.m^{-2}$), tanto para o HN, HS e Globo. É notável um aumento nos valores médios em todas as séries (Globo, HN e HS) nas últimas décadas. A escolha dessas séries (anos iniciais e anos finais) foi feita dessa forma para apresentar uma percepção mais clara no aumento dos valores de radiação de onda longa emitida pela superfície ao longo dos meses/ anos.

a)



b)



c)

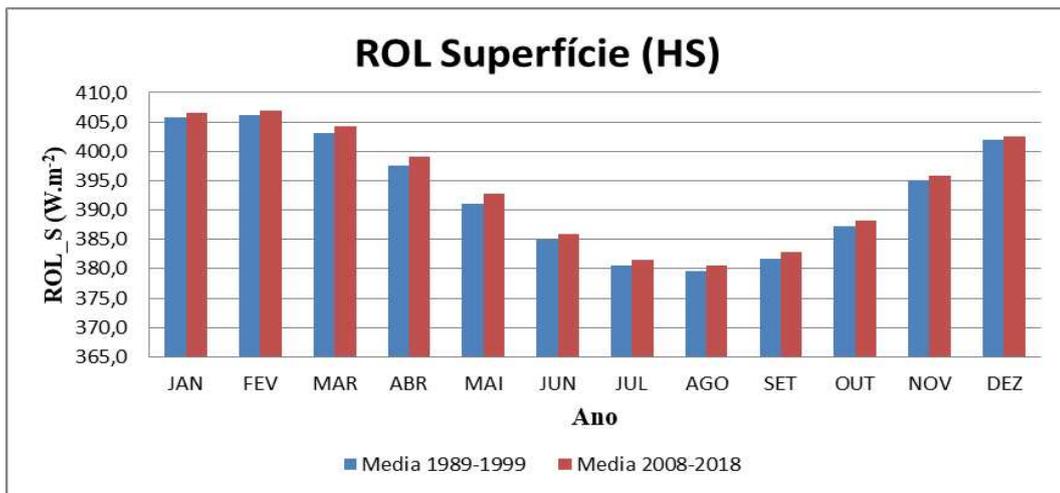


Figura 16: Variação sazonal da radiação de onda longa emitida pela superfície (W.m^{-2}): (a) para o Globo; (b) para o HN e (c) para o HS. Comparação de duas décadas distintas: anos iniciais (de 1989 a 1999) e anos finais de (2008 a 2018).

4.5 DISTRIBUIÇÃO SAZONAL MENSAL DAS VARIÁVEIS (ECMWF)

As variáveis a seguir fazem referência aos dados de reanálises do ECMWF, aos quais foram analisados os dados de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) a 2m e água precipitável (mm).

A Figura 17 faz referência a distribuição sazonal média da temperatura do ar a 2m ($^{\circ}\text{C}$), em que a curva para o HN (em vermelho) apresenta os maiores valores de temperatura entre os meses de julho e agosto (em torno de $21,8^{\circ}\text{C}$) correspondendo ao período de verão no hemisfério, e menores valores entre dezembro e fevereiro (em torno de 9°C) apontando o período de inverno no hemisfério. No HS apresenta maiores valores no período de dezembro a fevereiro (em torno de $16,5^{\circ}\text{C}$), ao contrário do HN, representando o período de verão no HS. No período de inverno entre julho e agosto, os valores encontram-se menores em torno de 11°C .

Há uma diferença de temperatura para os dois hemisférios devido a maior cobertura oceânica existente no HS, na qual os valores no verão no HN serão maiores devido a maior área continental, aquecendo mais do que no HS, e apresenta valores menores de temperatura, devido ao fato do continente resfriar mais rapidamente que os oceanos, por isso o HS no inverno apresenta pouca diminuição de temperatura. Tanto para os gráficos do NCEP quanto para o ECMWF os valores estão bem aproximados. Os valores globais oscilam em torno de 15°C corroborando com a temperatura média global encontrada na literatura.

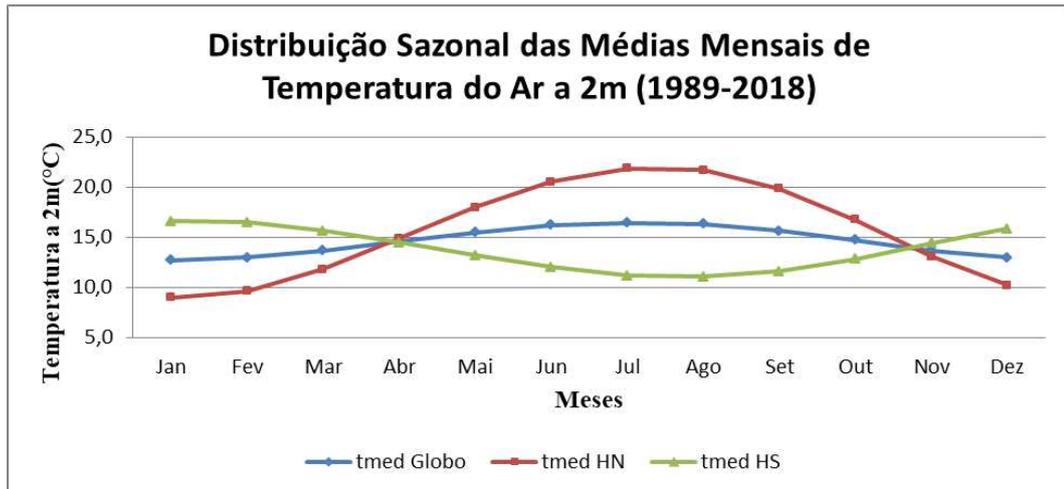


Figura 17: Distribuição das médias mensais da temperatura do ar (°C) a 2metros para o HN (curva em vermelho), HS (curva verde) e globo (curva azul) de 1989 a 2018.

Na figura 18 está representada a distribuição sazonal das médias mensais de água precipitável (mm). No HN os maiores valores encontram-se entre julho e agosto (33,5 mm), corroborando com o período de máximos (verão) para a temperatura do ar. Os valores menores (19 mm) ocorrem no mesmo período de inverno no HN observado para a temperatura do ar (figura 17). Para o HS, os maiores valores encontram-se entre janeiro e março (28,3 mm) período de verão do Hemisfério, e os menores valores encontram-se entre os meses de julho e agosto (em torno de 18,8 mm), correspondendo ao mesmo período em que houve maiores /menores valores de temperatura do ar a 2 m (figura17). Portanto, é notável que, quando há um aumento de temperatura, haverá um aumento de água precipitável devido a maior taxa de evaporação. Os valores globais encontram-se oscilando entre 23 e 25 mm.

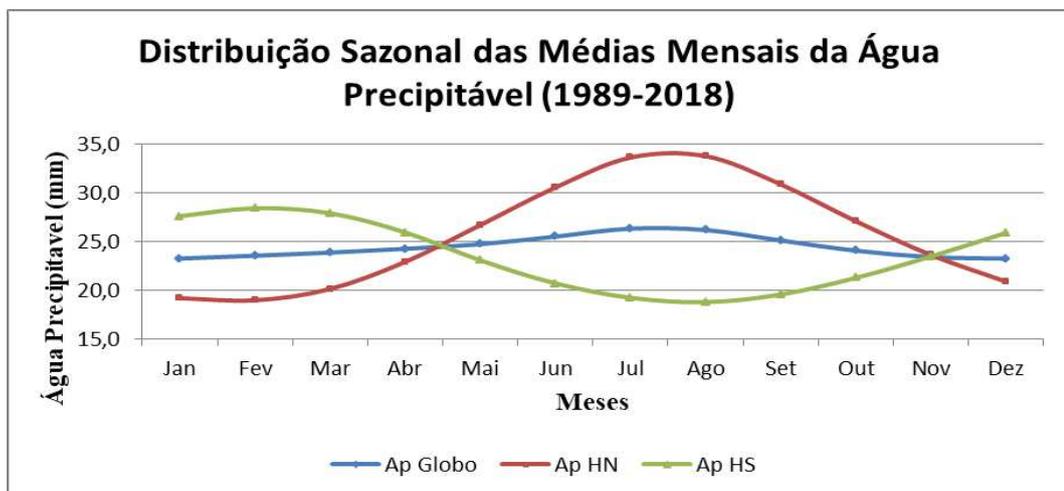


Figura 18: Distribuição das médias mensais da água precipitável (mm) para o HN (curva em vermelho), HS (curva verde) e globo (curva azul) de 1989 a 2018.

4.6 ANÁLISE DA TEMPERATURA DO AR (°C) A 2 METROS - ECMWF

4.6.1.1 Variação da temperatura do ar (°C)

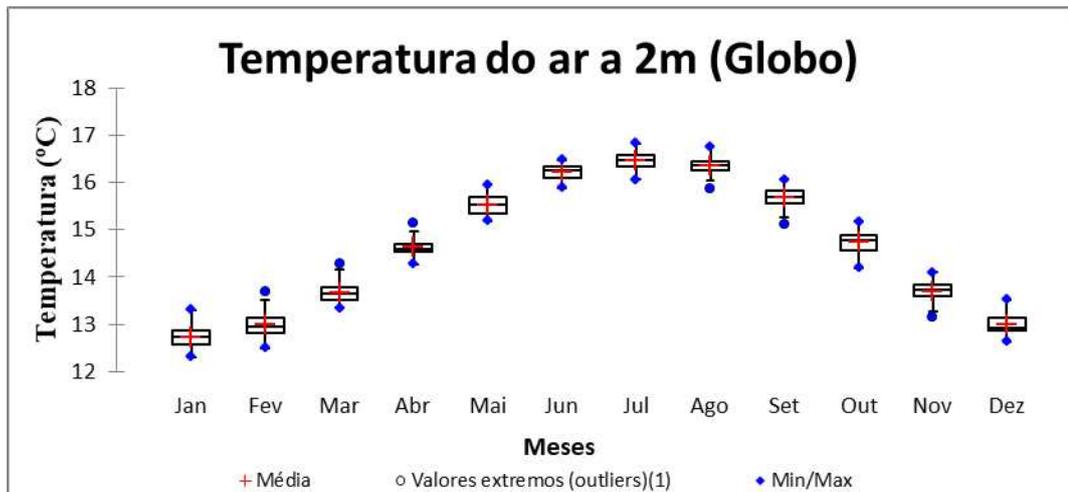
As figuras a seguir foram elaboradas em box plot para apresentar a variabilidade mensal de temperatura do ar a 2m (°C), para o globo, HN e HS, no período de janeiro de 1989 a dezembro de 2018 obtidos a partir dos dados de reanálises do ECMWF.

A Figura 19-a foi elaborada representando os valores médios mensais para todo o globo. Os meses que obtiveram maiores dispersões foram os meses de maio e o período de dezembro a fevereiro. Já os meses com menores dispersões foram os meses de abril e agosto. Os maiores valores de temperatura do ar a 2m encontram-se no mês de julho (16 °C) enquanto os valores mais baixos encontram-se entre dezembro e fevereiro (em torno de 13 °C). A média de todos a série encontra-se em cerca de 14,6 °C estando bem aproximada do valor médio da temperatura global do planeta (15°C).

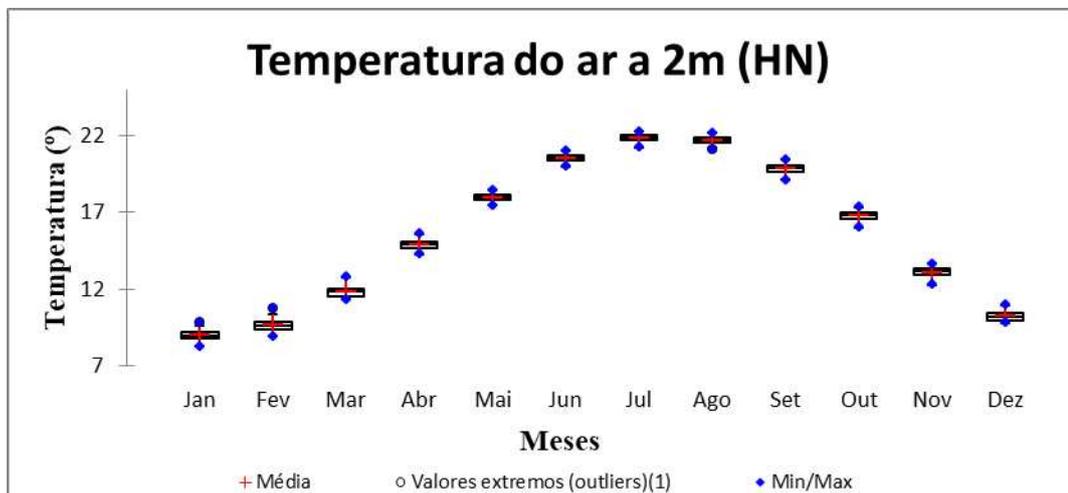
A Figura 19-b para o HN apresenta em todos os meses valores bem concentrados em torno da média, com pouca discrepância. Os valores com menores dispersões foram maio, junho e julho, com valores médios em torno de 17°C, 20°C e 21°C respectivamente. Os maiores valores da série correspondem ao período de verão no HN, durante os meses de julho e agosto, com valores médios em torno de 22°C. Já os menores valores no período de inverno, entre os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, com valores entre 9° a 10° C.

Para os HS (Figura 19-c) há um padrão inverso comparado com a imagem de box plot para o HN. Os valores também se encontram bem concentrados em torno da média, sendo o mês de julho com maior discrepância entre os dados ao passo que nos meses de janeiro e fevereiro, os dados se concentram em torno da média de 16 °C, quando são observados os maiores valores de temperatura do ar, coincidentes com o período de verão para o hemisfério Sul. Os valores menores correspondem ao período de inverno, notoriamente entre julho e agosto com valores em torno de 11°C.

a)



b)



c)

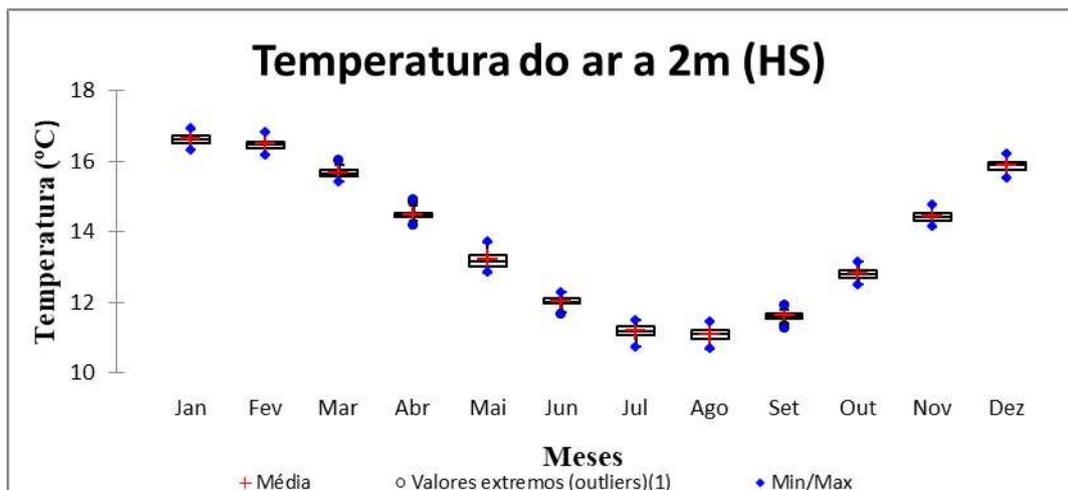


Figura 19: Temperatura do ar (°C) a 2 metros: (a) para o globo, (b) para o HN e (c) para o HS (ECMWF)

4.6.1.2 Aplicação dos testes estatísticos para a temperatura do (°C) - ECMWF

As análises seguintes foram realizadas a partir da execução dos testes estatísticos de Dickey Fuller, Shapiro Wilck, Mann Kendall e Pettitt para o Hemisfério Norte (HN), Hemisfério Sul (HS) e para todo o Globo para a variável temperatura do ar a 2 m (°C) a partir das reanálises do ECMWF.

Inicialmente foi utilizado o teste de raiz unitária de Dickey Fuller Aumentado (Said e Dickey, 1984) com o objetivo de avaliar se as variáveis seguem um processo estocástico estacionário. Como o p-valor calculado é maior que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), não rejeita-se a hipótese nula H_0 , para os três casos o HN, HS e Globo, ou seja, há uma raiz unitária para as 3 séries. Isto significa que as séries seguem um padrão não estacionário, podendo, portanto, serem aplicados os testes de Mann-Kendall e Pettitt.

O segundo teste foi o de Shapiro-Wilk, para verificar se as três séries temporais seguem uma distribuição normal, correspondentes ao HN, HS e Globo. Como os valores de p-valor foram todos maiores que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), não rejeita-se a hipótese nula H_0 para as 3 séries, portanto, todas as amostras seguem uma distribuição normal.

A seguir, foi aplicado o teste de Mann – Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) para determinar se a série de dados possui uma tendência temporal estatisticamente significativa. Para a variável observada, como o p-valor calculado é menor que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), deve-se rejeitar a hipótese nula H_0 em favor da hipótese alternativa H_a , nas 3 séries de dados para HN, HS e Globo, apresentando, portanto uma tendência temporal em cada uma delas. A autocorrelação foi obtida usando o método de Hamed and Rao (Hamed e Rao, 1998).

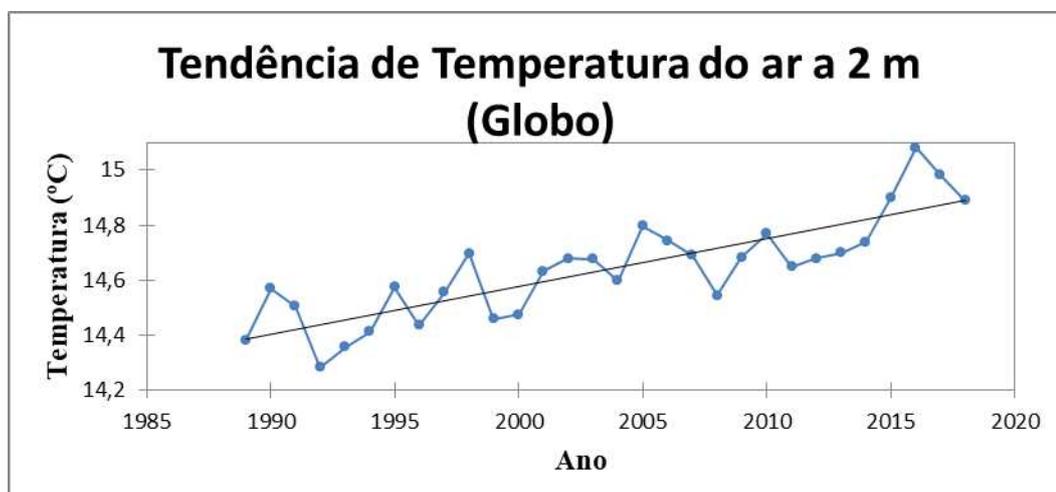
O método de Pettitt (Pettitt, 1979) foi utilizado para observar mudanças abruptas na série. Como o p-valor calculado é menor que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), deve-se rejeitar a hipótese nula H_0 em favor da hipótese alternativa H_a . Os anos em que ocorreu mudança abrupta na série foram 2004 para o Globo, 2002 para o HN e 2000 para o HS. Essas mudanças abruptas apontam aumento dos valores de temperatura, relacionado a uma tendência positiva na série, podendo estar relacionada à variabilidade interanual de temperatura durante os 30 anos de dados observados na série (como El Niño e La Niña) causando picos com aumento/diminuição dos valores observados na série de dados.

Tabela 4: Testes estatísticos para a variável temperatura do ar (°C) a 2 metros - ECMWF

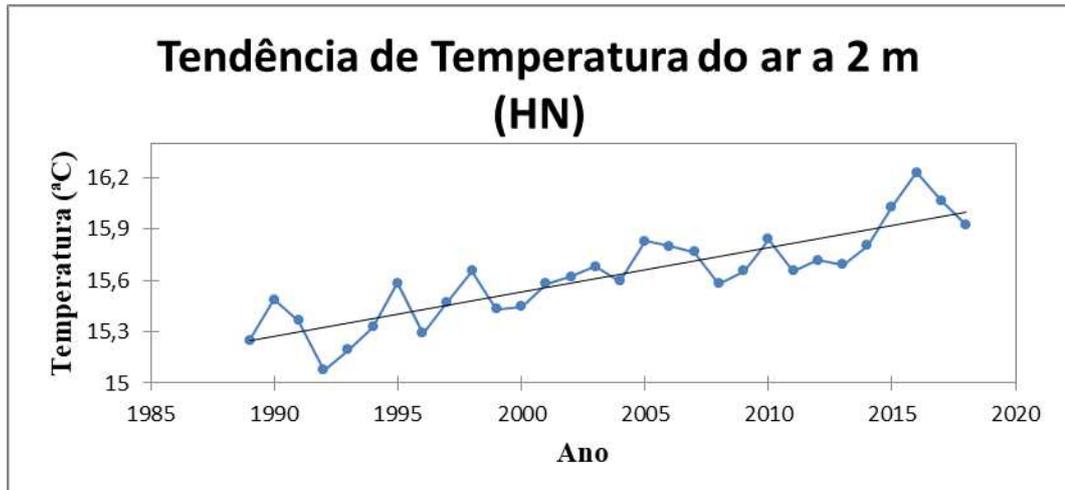
Método	Parâmetros	Globo	HN	HS
ADF	τ (observado)	-2,1477	-2,4254	-1,5794
	τ (crítico)	-0,5076	-0,5076	-0,5076
	p-valor	0,4738	0,3383	0,7346
Shapiro-Wilck	W	0,9817	0,9901	0,9497
	p-valor	0,8695	0,9918	0,1660
Mann - Kendall	τ	0,6505	0,6965	0,4620
	S	283,00	303,00	201,00
	Var(s)	3141,6	3141,6	3141,6
	p-Valor	< 0,0001	< 0,0001	0,0003
	Inclinação	0,0170	0,0256	0,0088
Pettit	K	196,00	210,00	154,00
	T	2004	2002	2000
	p-Valor	< 0,0001	< 0,0001	0,0037

A Figura 20 (a, b, c) a seguir apresenta tendência de temperatura do ar (°C) a 2 metros, aplicados a partir de Mann- Kendall, de acordo com a variabilidade anual para o HN, HS e para o Globo. É notável para todas as 3 séries há uma inclinação apontando uma tendência de valores positivos de temperatura, sendo também comprovado pelo cálculo de inclinação na linha de tendência pelo método de regressão linear.

a)



b)



c)

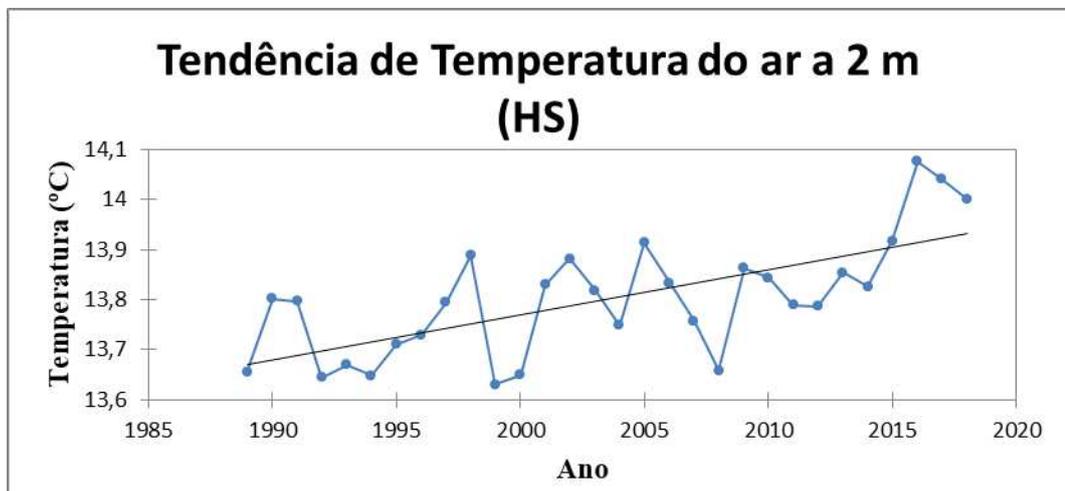


Figura 20: Tendência de Temperatura do ar a 2m (°C): (a) para o globo, (b) para o HN e (c) para o HS

Associada a estas figuras, encontram-se as figuras 21(a, b, c) que apresenta a variabilidade interanual da variável temperatura do ar para o Globo, HN e HS, na qual as séries são divididas em 2 períodos de acordo com os anos em que houve mudanças nas séries apontados pelo teste de Pettitt.

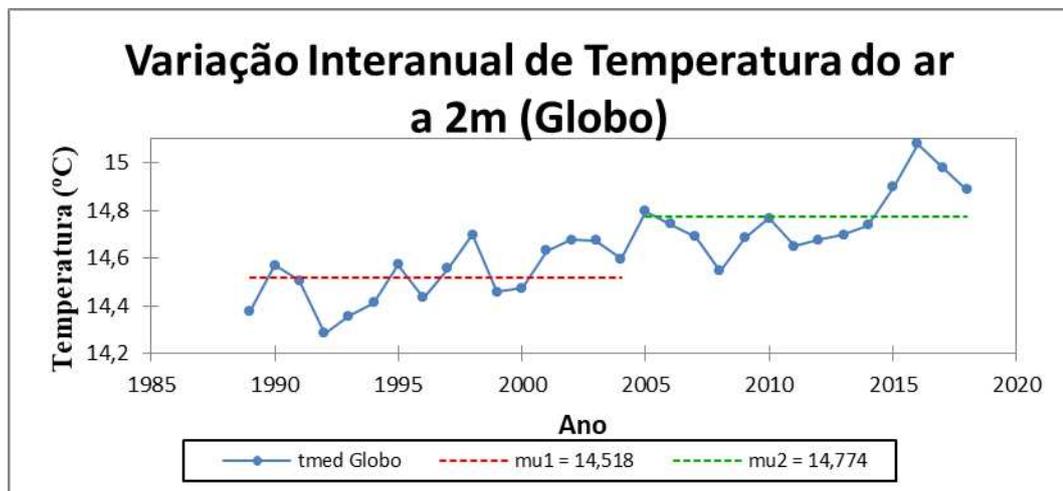
A Figura 21-a apresenta uma linha vermelha com média dos valores em torno de 14,5°C (de 1989 até 2004) para o globo, e outra linha verde é observada fazendo uma “quebra” da série de dados, apontando uma tendência positiva, com valores que oscilam em torno da média de 14,7 °C, iniciando desde o ano de 2005 até o ano final de 2018. É bem notável uma tendência positiva possivelmente relacionada ao aumento de temperatura do ar que pode estar associado às mudanças climáticas do planeta.

A Figura 21-b apresenta as séries de dados do HN, com duas divisões na série, uma que corresponde a linha vermelha com média de valores em torno de 15,4°C, desde 1989 até 2002, e outra parte da série que correspondem a linha verde, com média de valores de 15,8°C, de acordo com o período a partir de 2002 até 2018. A série aponta uma inclinação da curva de dados, apontando para tendências positivas, como foi possível observar nas Figuras anteriores.

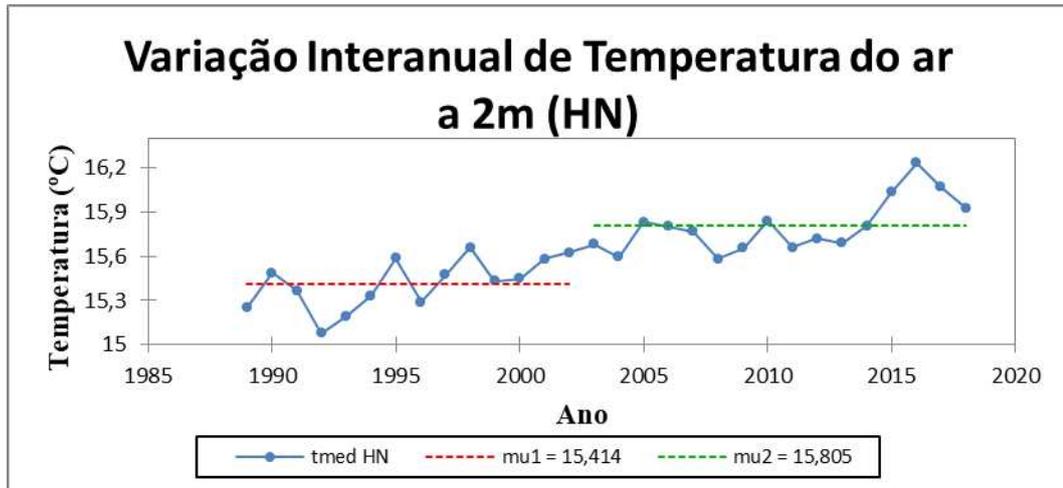
Na Figura 21-c a série também mostra tendência positiva dos valores médios ao longo dos anos, sendo dividida a partir de 1989 até o ano 2000, no qual a média dos valores foi de 13,7°C (linha em vermelho), e a segunda parte da série foi dada a partir do ano 2000 até 2018, com média dos valores em torno de 13,8°C. A divisão na série de dados foi feita a partir dos anos em que a série apresentou mudança abrupta segundo o teste de Pettitt.

É notável que em todas as séries apresenta-se um aumento sutil nos valores de temperatura do ar a 2m (°C), sendo este com valores maiores para o HN, devido a mudança na cobertura continental e oceânica entre os dois hemisférios.

a)



b)



c)

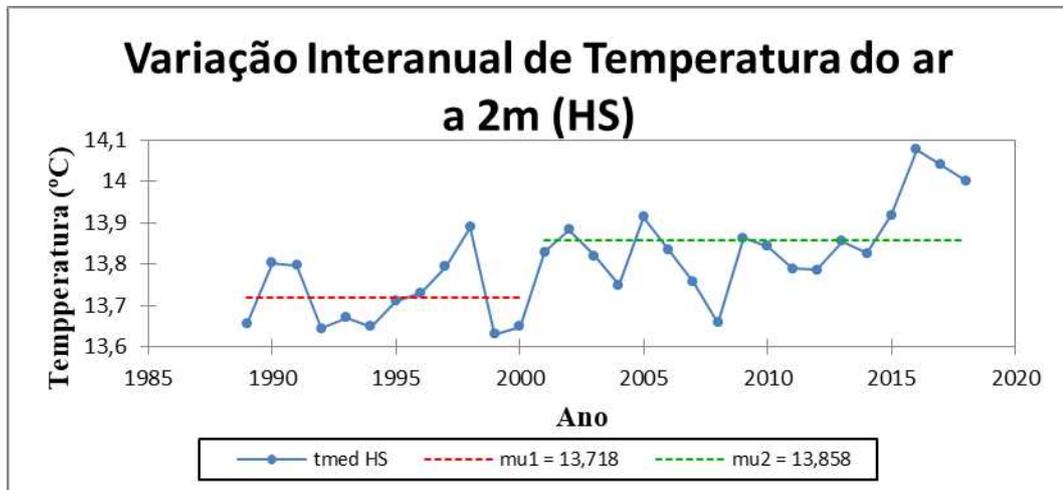


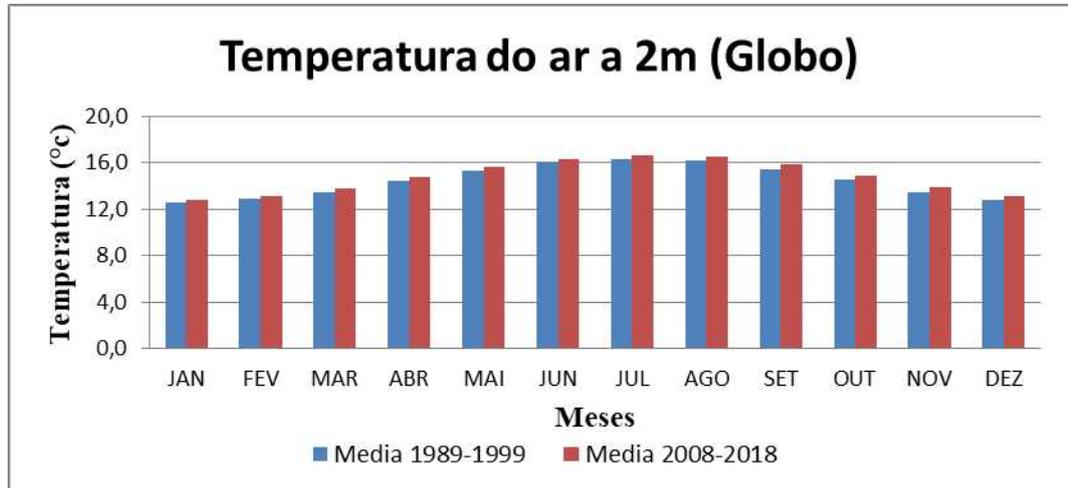
Figura 21: Variação interanual de Temperatura do ar a 2m (°C): (a) para o globo, (b) para o HN e (c) para o HS

A Figura 22 foi feita uma comparação sazonal entre os dados, em que foi feita uma média dos 10 anos iniciais de dados (de 1989 até 1998) comparando-se com a média dos 10 anos finais da série temporal (de 2009 até 2018). Foram utilizados apenas os 10 anos iniciais e os 10 anos finais da série para comparação pois dessa forma há uma melhor visualização dos valores médios da série, apontando mais facilmente esse aumento de temperatura ao longo dos anos.

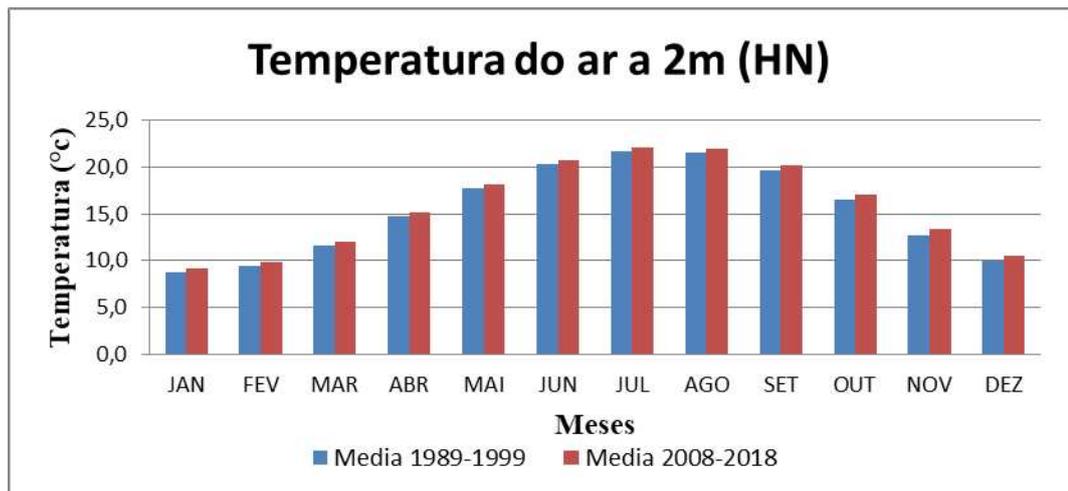
Para o globo (Figura 22-a) esse aumento corresponde a um valor médio em torno de 0,3 °C, para o HN esse aumento médio corresponde a valores em torno de 0,4°C (Figura 22-b) e para o HS corresponde a valores em torno de apenas 0,1°C (Figura 22-c), este último não notável para todos os meses da série. Portanto, é mais fácil notar que esse aumento foi maior no HN, apresentando no Hemisfério uma maior variabilidade de temperatura. Pode-se associar

esse sutil aumento de temperatura do ar a 2m, a uma maior variabilidade climática no planeta causando esta elevação de temperatura ao passar dos anos.

a)



b)



c)

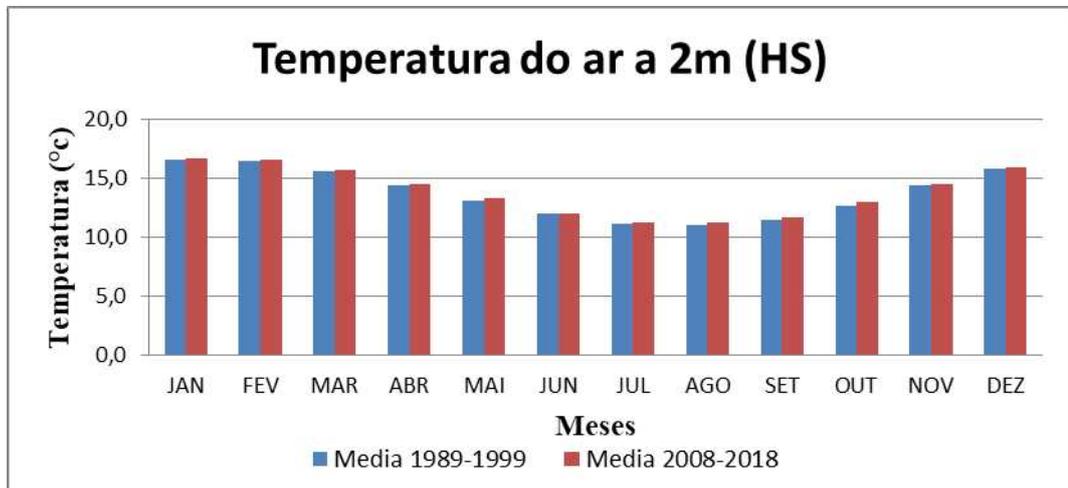


Figura 22: Variação sazonal da Temperatura do ar (°C) a 2 metros: (a) para o globo, (b) para o HN e (c) para o HS. Comparação de duas décadas distintas: anos iniciais (de 1989 a 1999) e anos finais (de 2008 a 2018).

4.7 ANÁLISE DA ÁGUA PRECIPITÁVEL – ECMWF

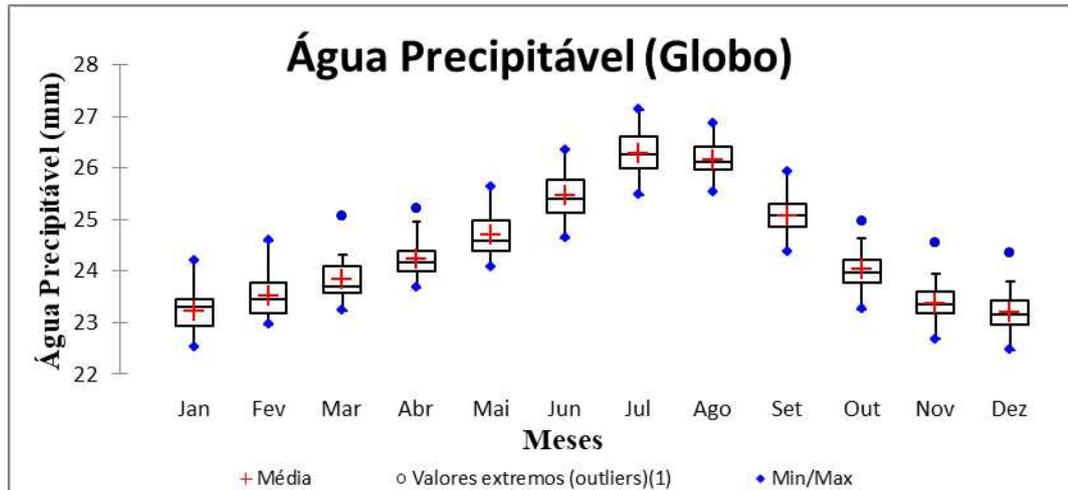
4.7.1 Variação Mensal da Água Precipitável

As figuras a seguir foram realizadas através do método box plot, do qual pode-se observar a variabilidade mensal dos dados, a dispersão, assimetria, ou outlier, pontos extremos acima ou abaixo dos valores médios das séries de dados, para o Globo, HN e HS. A Figura 23-a apresenta uma maior variabilidade nos valores de água precipitável para o Globo, durante os meses de junho e julho, e entre os meses de janeiro e fevereiro. Os meses que apresentaram menores dispersões foram abril, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro. Os meses de março e abril apresentam um valor atípico na série, assim como outubro, novembro e dezembro. Os maiores valores de água precipitável encontram-se no mês de julho (26 mm) enquanto os valores mais baixos encontram-se entre novembro, dezembro e janeiro (valores médios de 23 mm). A média para toda a série foi de 24,4 mm, valor bem aproximado do valor médio de água precipitável encontrado na literatura.

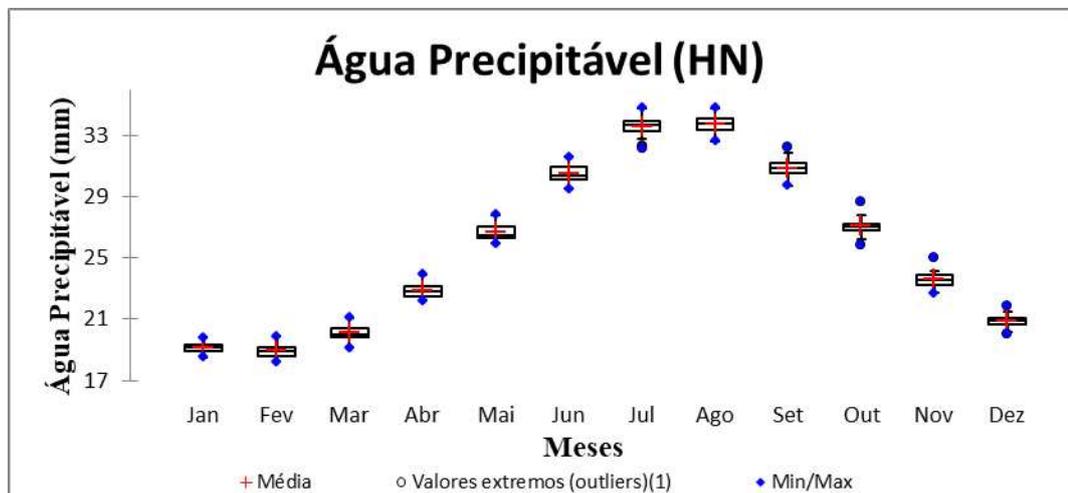
A Figura 23-b para a variabilidade mensal dos dados de água precipitável (mm) no HN apresenta pouca dispersão para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, correspondendo a valores médios de 19 mm. Os valores mais dispersos encontram-se entre maio e junho, em torno de 27mm a 31 mm, respectivamente. A curva apresenta uma elevação entre o período de verão para o HN, entre os meses de junho e agosto atinge valores médios de água precipitável em torno de 34 mm. Os valores menores são observados para o período de inverno, de dezembro a fevereiro (média de 19 mm).

Já a Figura 23-c para o HS apresenta baixa dispersão entre os meses, sendo o mês de julho em que ocorreram menores dispersões entre os dados (19 mm). Os maiores valores concentram-se nos meses de verão, entre dezembro a março, com valores médios em torno de 28 mm. Já os menores valores ocorrem no período de inverno, entre julho, agosto e setembro, período em que se observam valores médios em torno de 19 mm. Comparado ao HN, pode-se observar que os maiores valores de água precipitável ocorrem no HN, devido a um aumento maior de temperatura evidenciado, aumentando assim o teor d'água atmosférico.

a)



b)



c)

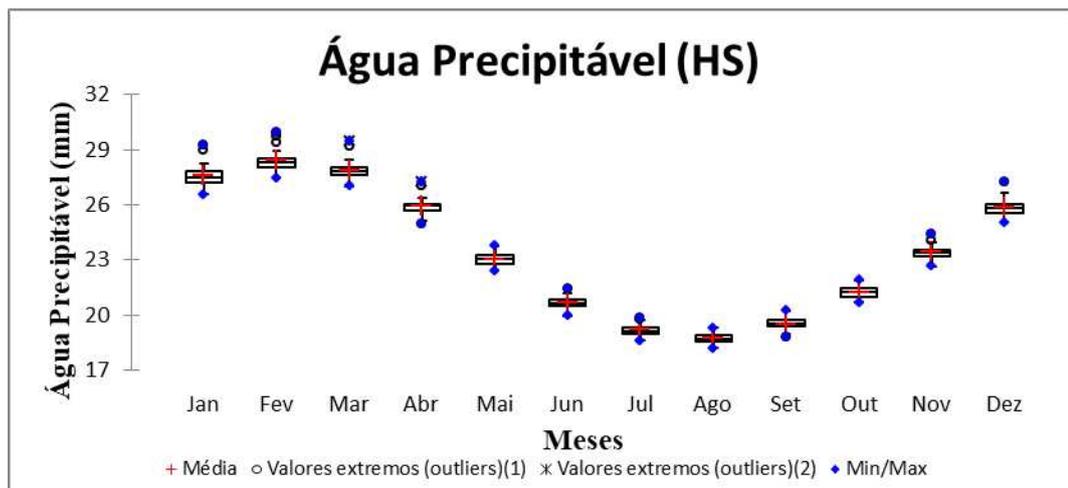


Figura 23: Água Precipitável (mm): (a) para o globo, (b) para o HN e (c) para o HS.

4.7.2 Aplicação dos testes estatísticos para a água precipitável (mm)

Utilizou-se inicialmente o teste de raiz unitária de Dickey Fuller aumentado (Said e Dick, 1984) para avaliar se a variável água precipitável segue um processo estocástico estacionário. Para o HN, HS e para o Globo (Tabela 5) como o p-valor calculado é maior que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), não se rejeita a hipótese nula H_0 , portanto há uma raiz unitária para a série, detectando que a série é não estacionária.

Depois, verificou-se a normalidade das 3 séries, para o HN, HS e Globo através do teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965). Observando os valores na Tabela 5, como o p-valor calculado é maior que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), não se rejeita a hipótese nula H_0 , as amostras das 3 séries (HN, HS e Globo) seguem uma distribuição normal.

Utilizou-se o teste de Mann Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) para determinar se a série de dados possui uma tendência temporal de alteração estatisticamente significativa. Na tabela 5 pode-se observar que as três séries apresentam tendência positiva em seus dados de água precipitável. Como o p-valor calculado é menor que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), deve-se rejeitar a hipótese nula H_0 em favor da hipótese alternativa H_a . Significa que para as três séries (HN, HS e Globo) há uma tendência positiva.

A análise de tendência em séries foi também feita pelo teste de Pettitt (Pettitt, 1979) para observar mudanças abruptas na série. Como o p-valor calculado é menor que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), deve-se rejeitar a hipótese nula H_0 em favor da hipótese alternativa H_a , ou seja, há uma data em que houve alteração nas séries de dados.

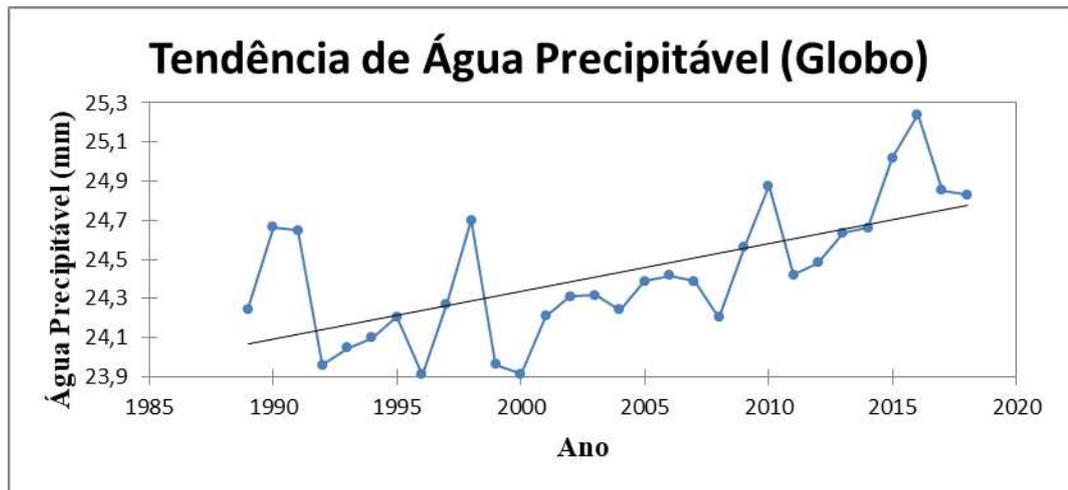
Os valores na tabela correspondem às datas em que houve alteração nos dados, sendo estas no ano de 2004 detectadas para o Globo, HN e HS. Essas mudanças abruptas apontam aumento dos valores de água precipitável, relacionado a uma tendência positiva na série, podendo estar relacionada à variabilidade interanual de temperatura durante os 30 anos de dados observados na série, ou a possível mudança climática global.

Tabela 5: Testes estatísticos para a variável água precipitável (mm)

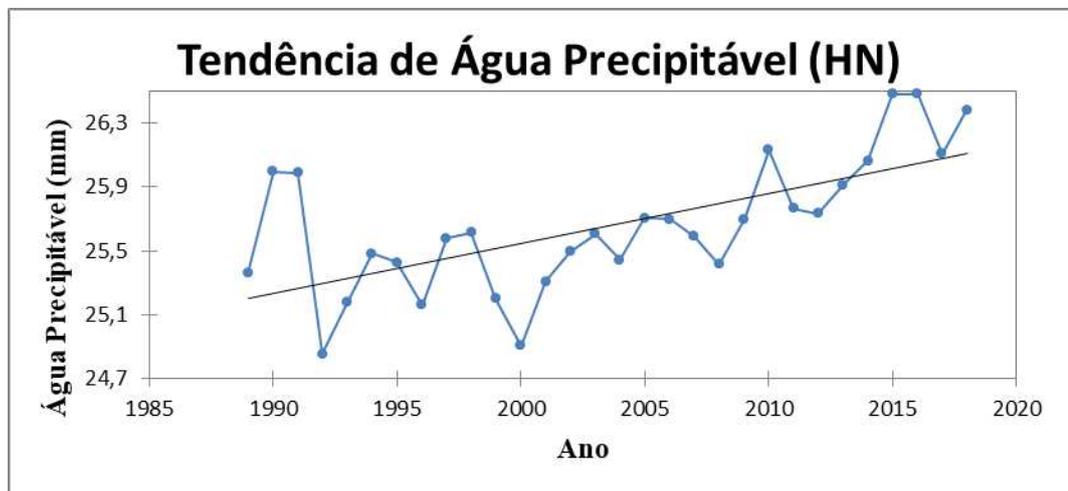
Método	Parâmetros	Globo	HN	HS
ADF	τ (observado)	-2,5069	-1,4554	-3,6151
	τ (crítico)	-0,5076	-0,5076	-0,5076
	p-valor	0,3024	0,7759	0,0434
Shapiro-Wilck	W	0,9672	0,9750	0,9605
	p-valor	0,4679	0,6851	0,3203
Mann - Kendall	τ	0,4988	0,5264	0,3977
	S	217,00	229,00	173,00
	Var(s)	3141,6	3141,6	3141,6
	p-Valor	0,0001	< 0,0001	0,0021
	Inclinação	0,0284	0,0364	0,0173
Pettit	K	172,00	182,00	156,00
	T	2008	2008	2008
	p-Valor	0,0007	0,0006	0,0029

As Figuras 24 (a, b e c) abaixo foram apresentadas as tendências nas séries temporais de água precipitável (mm) de acordo com valores médios anuais, tanto para o HN, HS e Globo. Há uma inclinação na série de dados apontando uma tendência de valores positivos de água precipitável (para o Globo, HN e HS) sendo também comprovado pelo cálculo de inclinação na linha de tendência pelo método de regressão linear. Há alguns picos nas séries que podem estar ligados a variabilidade interanual, apresentando maiores e menores valores em anos de El Niño e La Niña.

a)



b)



c)

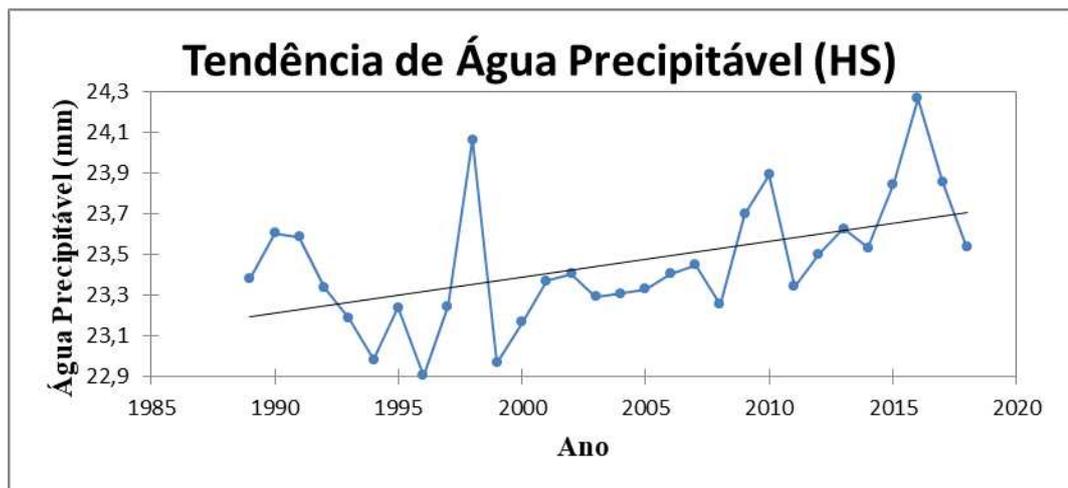


Figura 24: Tendência de Água Precipitável (mm): (a) para o globo, (b) para o HN e (c) para o HS.

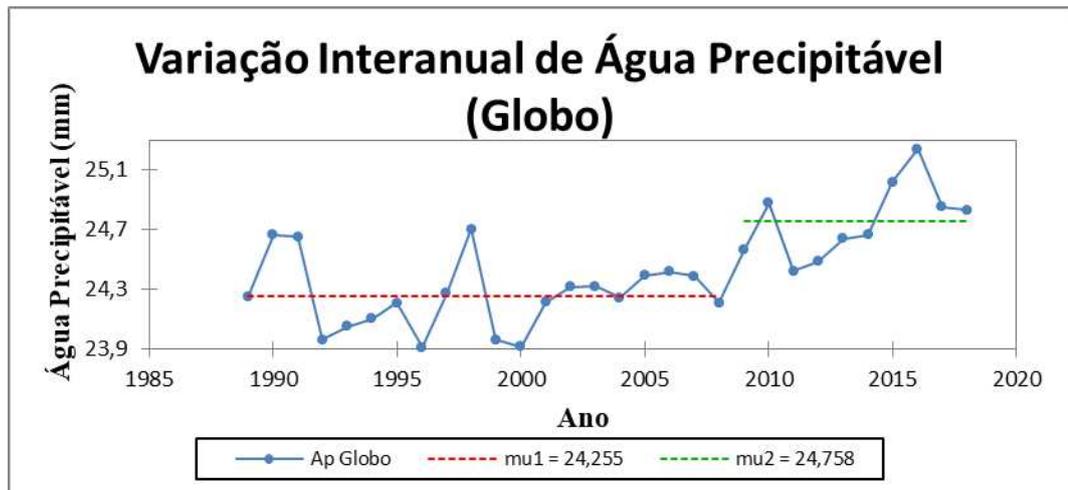
Através do método de Pettitt, foi possível observar o ano em que houve mudança abrupta na série de dados. Para as 3 séries, há uma variação interanual de água precipitável, do qual as linhas horizontais em vermelho e verde representam uma divisão dos dados em dois períodos distintos, mostrando que houve uma mudança abrupta na média de AP para o período, que no teste de Pettitt apontou o ano de 2008 para todas as séries.

A Figura 25-a apresenta a tendência de água precipitável para o globo, com média dos anos iniciais em torno de 24,5 mm (linha em vermelho) e média dos anos finais a partir de 2008 em torno de 24,7 mm (linha verde), mostrando uma diferença de 0,3 mm de um período para o outro.

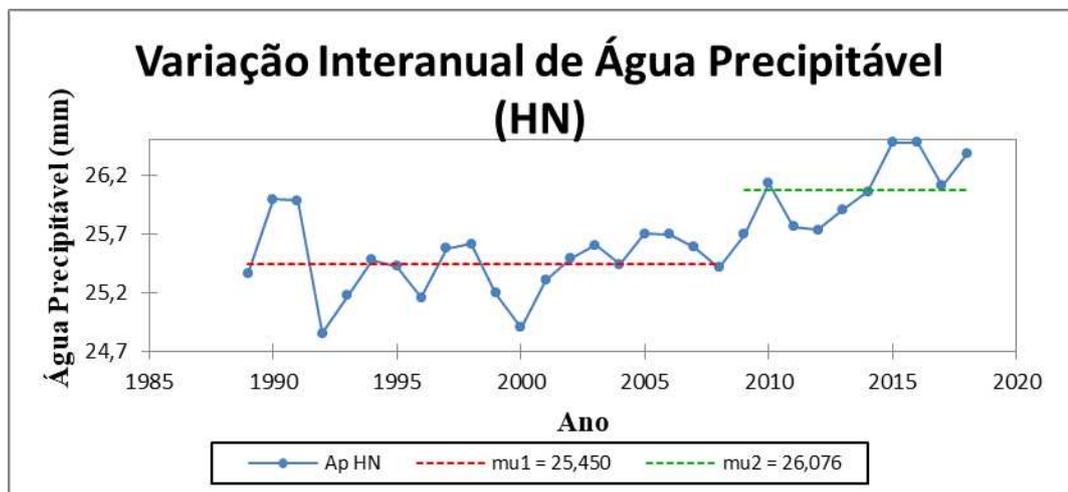
Na Figura 25-b representa a variação interanual de água precipitável para o HN, usando o mesmo procedimento apontando que houve uma mudança na média no período em estudo, com valores médios de 25,4 para os anos iniciais (de 1989 até 2008) e com valores de 26 mm para os últimos anos (a partir de 2008 até 2018), com um aumento significativo de 0,6 mm. Esses valores encontrados nas reanálises do ECMWF corroboram com os do NCEP/NCAR, apresentando-se bem aproximados.

Para o HS (Figura 25-c) a série de dados de água precipitável apresenta valores médios em torno de 23,3 mm para os primeiros anos até 2008, (linha em vermelho) e apresenta valores médios em torno de 23,7 (linha verde) com aumento em torno de 0,4 mm. Neste caso o HS obteve um menor aumento devido ao fato de o hemisfério ter uma maior extensão em área oceânica do que continental, agindo desta forma como regulador térmico havendo, portanto, pouca variação de água precipitável ao longo dos anos, devido ao menor aquecimento segundo os valores de temperatura do ar a 2m apresentando-se mais amenos para o Hemisfério Sul.

a)



b)



c)

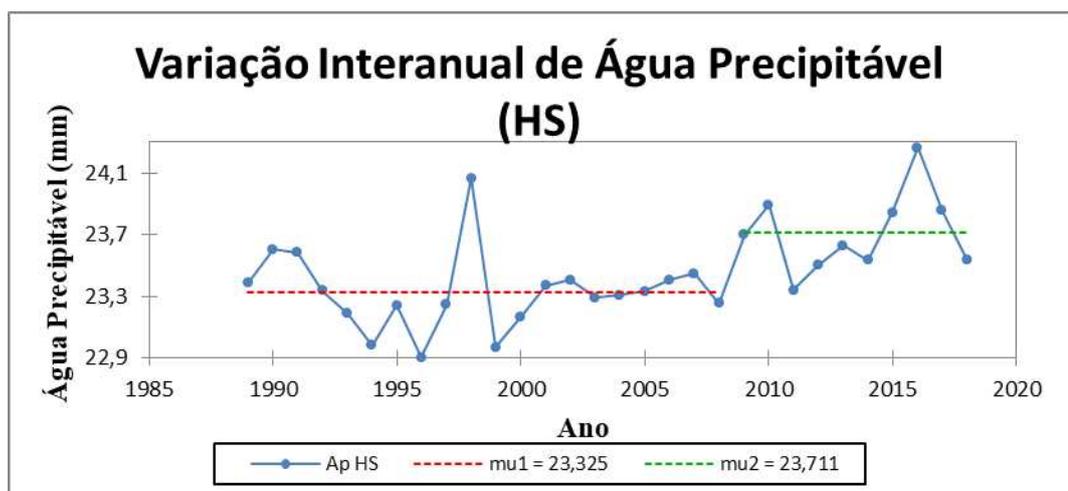
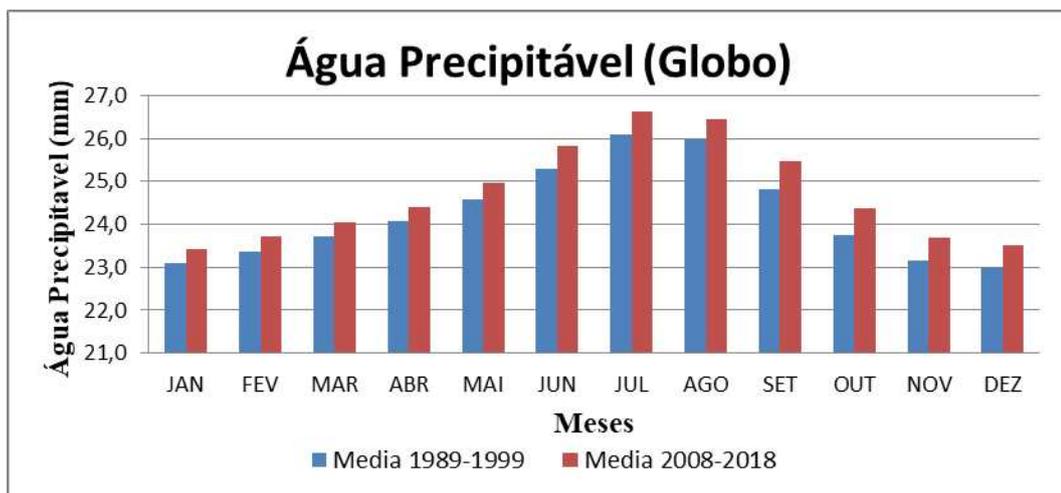


Figura 25: Variação interanual de Água Precipitável (mm): (a) para o globo, (b) para o HN e (c) para o HS.

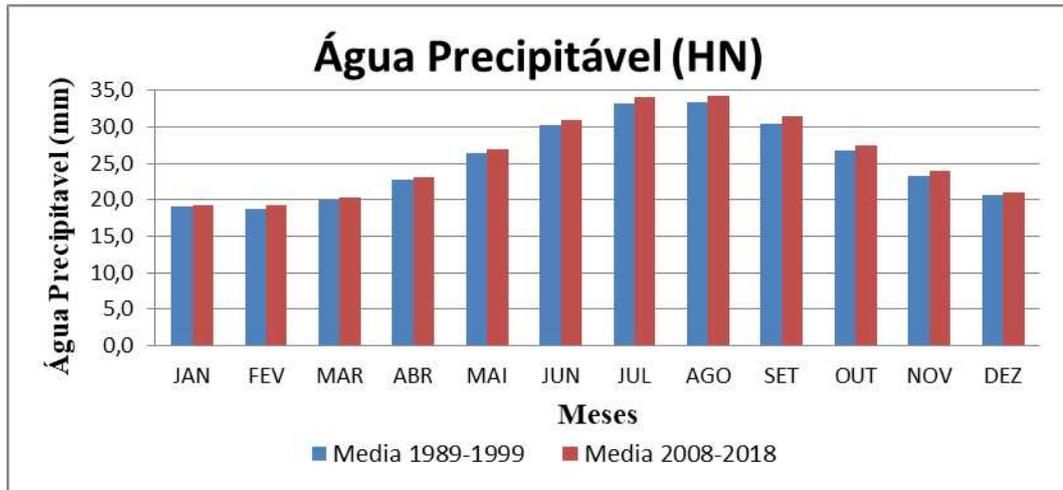
As figuras a seguir foram elaboradas a partir de uma comparação sazonal entre os dados, em que foi feita uma média dos 10 anos iniciais de dados (de 1989 até 1998) comparando-se com a média dos 10 anos finais da série temporal (de 2009 até 2018). Foram utilizados apenas os 10 anos iniciais e os 10 anos finais da série para comparação pois dessa forma há uma melhor visualização dos valores médios da série, apontando mais facilmente esse aumento de temperatura ao longo dos anos.

Para o globo (Figura 26-a) apresentou um aumento dos anos finais comparados aos iniciais, correspondente a um valor médio em torno de 0,6 mm, mais notável entre os meses de julho a setembro. Para o HN esse aumento médio foi mais sutil em todos os meses, corresponde a valores em torno de 0,4 mm (Figura 26-b) e para o HS corresponde a valores em torno de 0,3 a 0,4 mm (Figura 26-c). Portanto, é mais fácil notar esse aumento de água precipitável no HN, pois como o hemisfério apresenta uma maior variabilidade de temperatura, haverá maior evaporação na atmosfera, causando um alto teor de vapor d'água como pode-se notar. Pode-se associar esse sutil aumento em todas as 3 séries de dados, a uma maior variabilidade climática no planeta causando esta elevação de temperatura ao passar dos anos e assim, maior teor de vapor na atmosfera.

a)



b)



c)

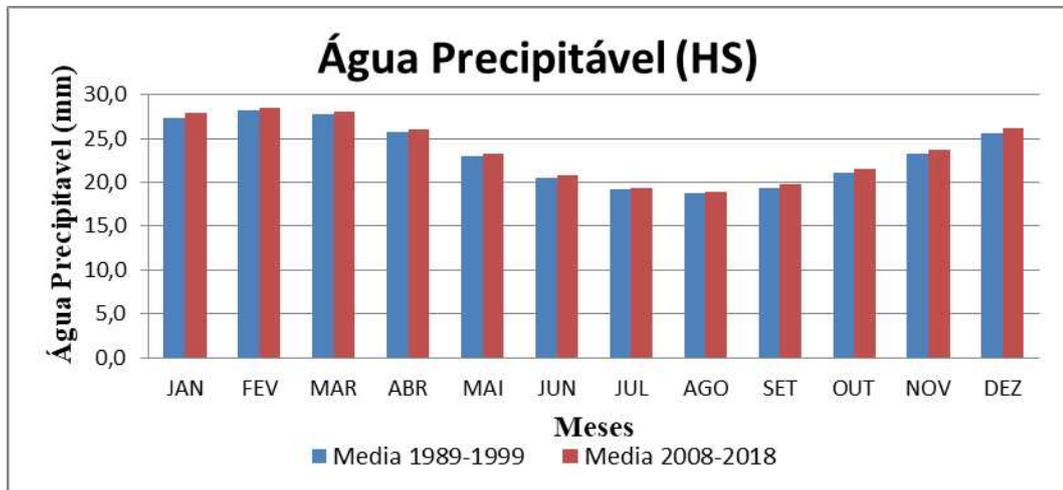


Figura 26: Variação sazonal de água precipitável (mm): (a) para o globo, (b) para o HN e (c) para o HS. Comparação de duas décadas distintas: anos iniciais (de 1989 a 1999) e anos finais (de 2008 a 2018).

4.8 COMPARAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS ESPACIALIZADAS (NCEP/NCAR E ECMWF)

Abaixo se encontra a distribuição espacial da tendência para as variáveis trabalhadas, temperatura do ar a 2m, água precipitável e radiação de onda longa emitida pela superfície. Essa distribuição espacial foi realizada fazendo-se a diferença entre a média dos 10 anos iniciais da série de dados (de 1989 a 1998) e os 10 anos finais da série de dados (de 1999 a 2018). Esse período foi escolhido dessa forma para facilitar a visualização dos pontos que apresentam tendência positiva ou negativa.

Na tabela 6, encontra-se a comparação entre os valores de correção e de tendência de Man-Kendall calculados para NCEP/NCAR e ECMWF, para cada variável. Há uma ótima

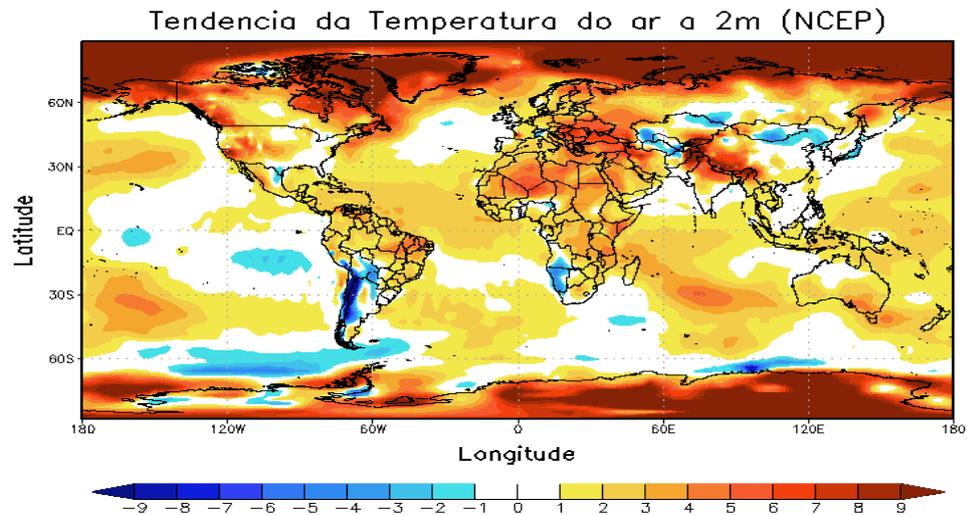
correlação entre os dados e os valores de inclinação tanto para o NCEP quanto para o ECMWF foram bem similares, apresentando para a temperatura do ar a 2 m uma tendência em torno de 0,02 para Globo, 0,03 para o HN e 0,01 para o HS. A água precipitável apresenta uma tendência em torno de 0,03 para o globo, 0,04 para o HN e de 0,02 para o HS. Para estes últimos dados do HN, há uma pequena diferença entre o NCEP e ECMWF. Já a variável radiação de onda longa emitida pela superfície, apresenta em torno de 0,1 para o globo, 0,14 para o HN e de 0,06 para o HS. Esta última não pôde ser comparada com o ECMWF devido à ausência desta variável.

Tabela 6: Comparação dos valores de correlação e tendência para HN, HS e Globo.

	Parâmetros	Temperatura		Água Precipitável		Radiação
		NCEP	ECMWF	NCEP	ECMWF	NCEP
GLOBO	Correlação	0,6781	0,6505	0,5816	0,4988	0,6551
	Inclinação	0,0229	0,0170	0,0331	0,0284	0,1002
HN	Correlação	0,6919	0,6965	0,6000	0,5264	0,6781
	Inclinação	0,0290	0,0256	0,0443	0,0364	0,1396
HS	Correlação	0,6275	0,4620	0,4758	0,3977	0,5172
	Inclinação	0,0155	0,0088	0,0259	0,0173	0,0593

A Figura 27 apresenta a espacialização dos dados de temperatura do ar a 2 metros para o NCEP/NCAR (27-a) e ECMWF (27-b). É interessante notar que há uma tendência positiva de aumento de temperatura do ar a 2m nas altas latitudes. Como na faixa equatorial a variação de temperatura é menor ao longo dos anos, ao contrário do que ocorre nos polos, esse contraste se torna maior para os polos. Nas regiões oceânicas tanto apresenta valores positivos de tendência quanto núcleos com valores negativos (variando de -0,02 a 0,02 mm/ano). Os valores máximos chegam a atingir valores positivos de tendência de 0,09 mm/ano. O fato desse aumento de temperatura ser maior nos polos se comprova principalmente ao fato que nesta região têm-se evidências de áreas onde há derretimento de gelo (Hardy, 2003), indicando então um possível aquecimento, associado ao aumento de temperatura.

a



b

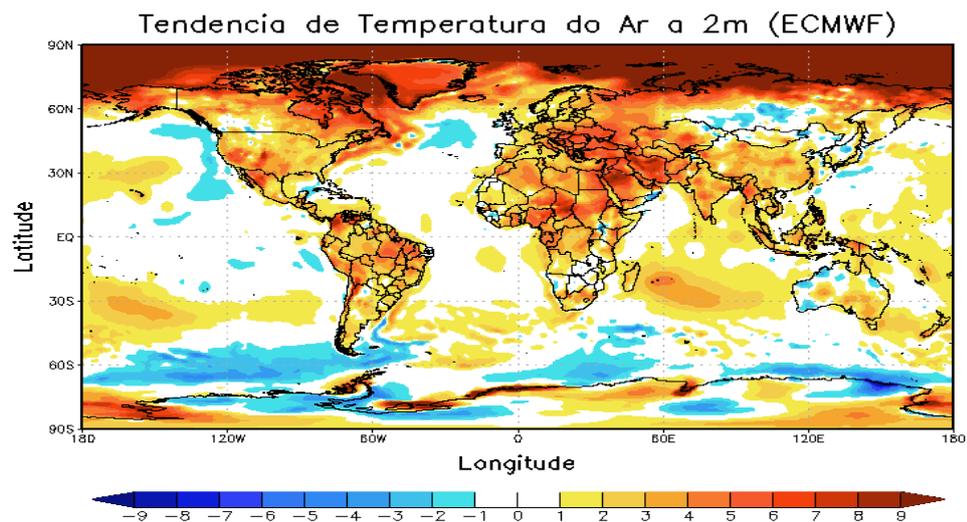
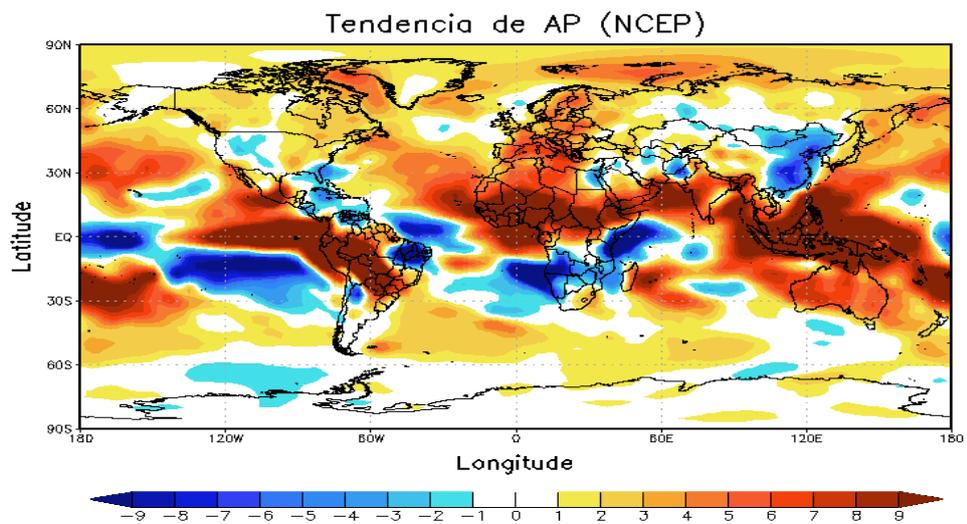


Figura 27: Comparação entre tendência espacial da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) a 2 metros (NCEP e ECMWF)

A comparação entre a distribuição espacial da tendência de AP para o NCEP/NCAR e para o ECMWF pode ser observada na figura 28, em que há núcleos apontando maiores valores de tendências na região tropical (apontando para aumento de água precipitável), bem como há núcleos com valores de tendência negativos, apontando para uma diminuição de água precipitável. Observa-se que grandes áreas nos Oceanos Atlântico e Pacífico Tropicais apresentam tendências de diminuição de AP. Pode-se concluir que nessas áreas há um possível resfriamento (Gaffen *et al.*, 1992; Mears *et al.*, 2007). Na faixa polar acima de 60°N é notável tendências positivas de AP (em torno de 0,02 a 0,05 mm/ano) observado em ambas as figuras

(NCEP e ECMWF). Já na faixa Polar Sul, praticamente não se observa tendência, tanto para a figura de AP do NCEP quanto para a figura de AP do ECMWF. É interessante notar que na América do Sul, o Nordeste apresenta um núcleo com tendências negativas bem notáveis em ambas as figuras.

a)



b)

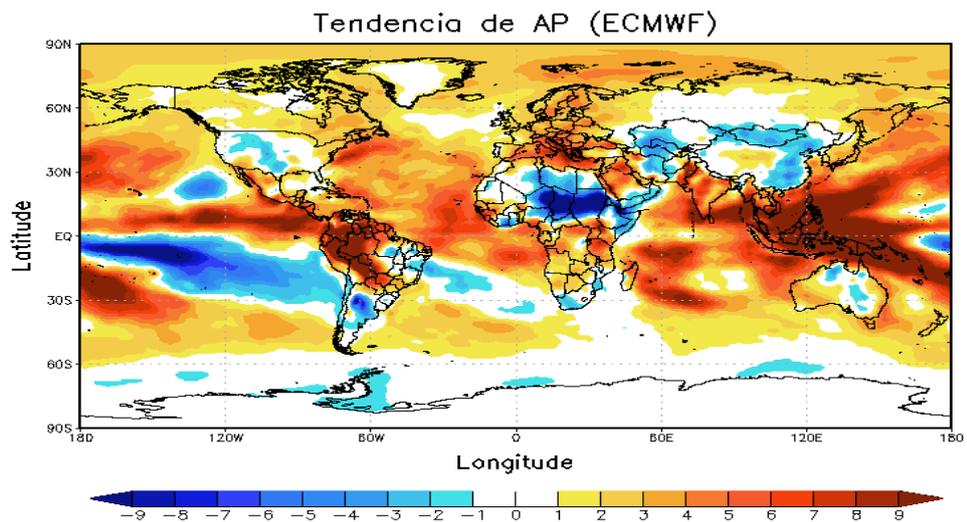


Figura 28: Comparação entre tendência espacial da água precipitável (NCEP e ECMWF)

Por fim, foi especializada a variável tendência de radiação de onda longa emitida pela superfície. Porém, esta foi feita apenas para os dados do NCEP, devido ao fato do acervo de dados do ECMWF não possuir ainda esta variável. É notável uma tendência positiva de radiação

emitida pela superfície nos polos e nos continentes (com valores de $0,27 \text{ W.m}^{-2}/\text{ano}$), assim como detectado para a variável temperatura do ar a 2m. Nas regiões oceânicas tanto apresenta núcleos com valores positivos de tendência, quanto há com valores negativos (entre $-0,06$ e $0,09 \text{ W.m}^{-2}/\text{ano}$). Na América do Sul nota-se um aumento de radiação emitida pela superfície na faixa Norte-Nordeste e uma diminuição da faixa Sudoeste-Sul. O oceano Pacífico central concentra um núcleo negativo (em torno de $-0,03 \text{ W.m}^{-2}/\text{ano}$), apresentando outro núcleo positivo mais a oeste (em torno de $0,06$ a $0,12 \text{ W.m}^{-2}/\text{ano}$). Como a radiação está intimamente associada à temperatura do ar, podemos ver uma grande similaridade entre essas variáveis.

a)

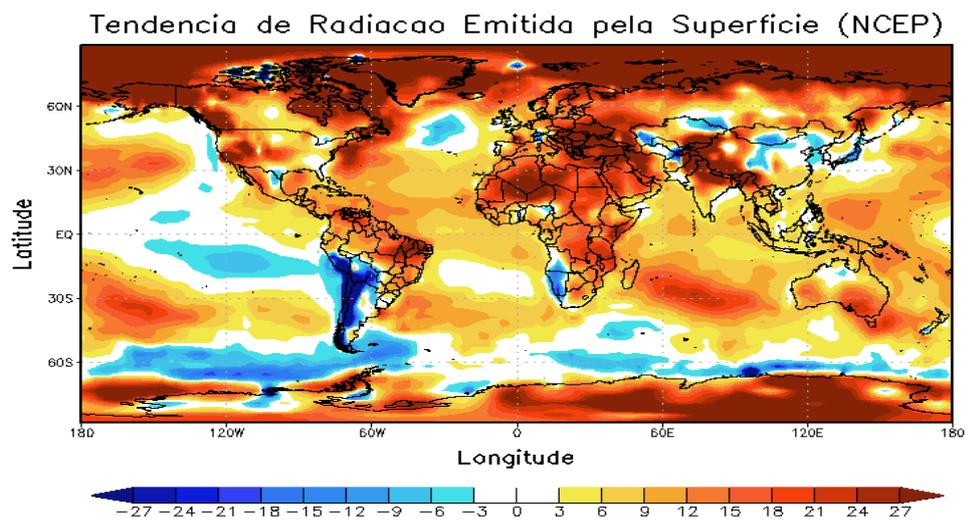


Figura 29: Tendência espacial da radiação de onda longa emitida pela superfície (NCEP)

5 CONCLUSÃO

De acordo com as análises feitas, foram observadas as seguintes conclusões:

1. Distribuição sazonal

Tanto para o NCEP quanto para o ECMWF, os maiores valores de temperatura do ar (a dois metros) no período de verão, estão em torno de 21 °C para o HN, 16,5 °C para o HS e oscilam em torno de 15 °C para o Globo, corroborando com a temperatura média global encontrada na literatura de 15 °C, estimada inicialmente por Jean Baptiste Fourier (1824) e que muitos pesquisadores utilizam até hoje como referência. Observam-se valores mais amenos para o HS devido a menor variação de temperatura anual pela absorção de calor nos oceanos. A variável água precipitável, para o NCEP e ECMWF, apresenta maiores valores entre os meses de verão para o HN (em torno de 33 mm), e entre os meses de janeiro a março para o HS (em torno de 28 mm), e para o globo os valores oscilam entre 23 a 25 mm, corroborando com os valores médios globais de AP (24 mm) encontrados por Cavalcanti e Mariano (2016), correspondentes a um volume de $12,237 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (cerca de 12 trilhões de vapor d'água na atmosfera). A radiação emitida pela superfície terrestre (NCEP) aponta maiores valores entre julho e agosto para o HN (430 W.m^{-2}), entre janeiro e fevereiro para o HS (em torno de 406 W.m^{-2}) e valores globais em torno de 388 a 406 W.m^{-2} . Através da equação da radiação de Stefan- Boltzmann ($R = \epsilon\sigma T^4$), se utilizarmos o valor da temperatura média global (15°C) encontraremos a média de radiação global em torno de 390 W.m^{-2} em concordância com os valores médios globais encontrados acima. Podemos também estimar a comparação dos dados de temperatura do ECMWF e observar que os valores médios de radiação de onda longa emitida pela superfície são bem aproximados dos dados do NCEP/NCAR.

2. Tendências nas variáveis climáticas

As análises estatísticas apontam tendências positivas pelo teste de Mann Kendall, bem aproximadas entre o NCEP e ECMWF. Os valores de temperatura do ar a 2 metros são: de 0,0290 e 0,0256 °C/ano para o HN; 0,0155 e 0,0088°C/ano para o HS e 0,0229 e 0,0170 °C/ano para o Globo. A água precipitável apresentou: 0,0443 e 0,0364 mm/ano para o HN; 0,0259 e 0,0173 mm/ano para o HS e 0,0331 e 0,0284 mm/ano para o Globo. Os valores de radiação de onda longa emitida pela superfície para o NCEP correspondem a 0,1396, 0,0593 e 0,1002 para o HN, HS e Globo, respectivamente. Para todas as séries analisadas há um aumento das

variáveis, e como todas estão associadas e bem correlacionadas, há um indício de aquecimento para o globo. Ao se comparar os 10 anos anteriores com 10 anos posteriores das séries, há um aumento sutil para cada mês, nas 3 variáveis analisadas.

3. Distribuição espacial

A espacialização dos dados do NCEP e ECMWF são bem aproximadas. A temperatura do ar a 2 metros apresenta aumento significativo (0,09 mm/ano) nas regiões de altas latitudes principalmente para o HN, com alguns núcleos significativos nas áreas continentais. Esse aumento nos pólos se comprova por haver maior derretimento de gelo nessas áreas, comprovando um aquecimento. (Hardy, 2003). A variável água precipitável apresenta núcleos significativos apontando para aumento de água precipitável, principalmente nas regiões tropicais e na faixa polar norte. Nas áreas oceânicas tanto há núcleos com tendências positivas quanto negativas, evidenciando possíveis padrões de resfriamento, que podem estar relacionados ao El Niño e à La Niña, que talvez fiquem mais claros após serem analisados em estudos mais minuciosos observados a cada mês. É notável uma redução de AP no Nordeste e Sul da América do Sul.

Portanto, houve aumento de temperatura e água precipitável em regiões remotas, que podem estar de acordo com as análises feitas pelo IPCC para prognósticos futuros. Esse aumento pode estar associado também a ações antrópicas, causando aumento da temperatura principalmente nas áreas em que se observam derretimento das geleiras, aumento dos níveis oceânicos, e fatores extremos cada vez mais elevados, secas severas e chuvas intensas, porém são necessários outros estudos para que seja feita uma análise mais detalhada que correlacione esses efeitos. No geral, de acordo com o objetivo desse trabalho, os dados do NCEP e ECMWF apresentaram-se bem significativos e aproximados podendo ser utilizados em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BACK, Álvaro José. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, Estação Experimental de Urussanga, vol.36, n.5, pp.717-726, 2001. [ISSN 0100-204X].

BERIGO, J. S.; THEBALDI, M. S. Análise da tendência temporal da precipitação do município de Formiga – MG, Enciclopédia Biosfera, v. 14, n. 25, 2017. [ISSN: 1809-0583].

BLAIN, G. C.; LULU, J. Considerações estatísticas relativas a seis séries mensais de temperatura do ar da secretaria de agricultura e abastecimento do Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 26, n. 2, p. 279-296, 2011.

CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SANTOS, C. S. WRF: wind simulation and wind energy production estimates forced by different reanalyses: Comparison with observed data for Portugal. *Applied Energy*, v. 117, p. 116–126, 2013.

CAVALCANTI, E. P.; GANDU, A. W.; AZEVEDO, P. V. Transporte e balanço de vapor d'água atmosférico sobre o Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 17, n. 2, p. 207-217, 2002.

CAVALCANTI, E. P.; GOMES FILHO, M. F.; BEZERRA, W. de A. Fluxo de vapor d'água atmosférico na obtenção do resíduo ET-P em três macro regiões brasileiras. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 12, p. 471-479, 2008.

CAVALCANTI, E. P.; MARIANO, E. B. Tendência do vapor d'água na atmosfera mediante dados do NCEP/NCAR. Revista Brasileira de meteorologia. [online]. vol. 31, n. 4, suppl.1, pp. 564-569, 2016. (ISSN 0102-7786).

COSTA, A.; DE OLIVEIRA, V. G.; PEREIRA, A. R.; *et. al.* Estudo do clima na região do Brejo Paraibano utilizando técnicas de séries temporais, para previsão com o modelo Sarima. *Gaia Scientia*, v. 9, n. 1, 2015.

COSTA, V. J.; FERREIRA, M.; CORDEIRO, M. T. A. Análise de séries temporais climáticas. Revista de Ciências Agroveterinárias (UDESC), v. 14, p. 287-295, 2015.

DEE, D. P.; UPPALA; S. M.; SIMMONS, A. J.; *et. al.* The Era-Interim Reanalysis: configuration and performance of data assimilation system. *Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society*, n. 137, p. 553-597, April, 2011.

DELGADO, R.C.; DE SOUZA, L.P. Tendência da precipitação e seu aproveitamento para fins não potáveis na Amazônia ocidental, Acre. *Nativa*, v. 2, n. 4, p. 208-213, 2014.

DICKEY, D. A.; FULLER, W. A. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit Root. *Journal of the American Statistical Association*, v.74, n. 366, p. 427-431, 1979.

DICKEY, D. A.; FULLER, W. A. Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. *Econometrica*, v. 49, n. 4, p. 1057-1072, 1981.

DORIGHELLO TOMÁS, D.; LOMBARDO, M. A. Concentração de vapor d'água na atmosfera de áreas urbanas, SÃO PAULO/BRASIL. *Mercator-Revista de Geografia da UFC*, v. 11, n. 25, 2012.

FERRARI, A. L.; VECCHIA F. A. Z; COLABONE, R. O. Tendência e variabilidade anuais da temperatura e da pluviosidade em Pirassununga. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 10, n. 8, p.30-46, 2012.

FERREIRA, C. D. C. M.; BATISTA, G. M. F.; VIANNA, Y. C. G. Variações ou tendências climáticas: um estudo com as séries de temperatura do ar para a cidade de Juiz de Fora - MG. *Revista de Ciências Humanas, Viçosa*, v. 15, n. 2, p. 414-433, dez. 2015.

FERREIRA, F. F. et al. Comportamento das águas superficiais nos oceanos Pacífico e Atlântico durante o período de 1982 a 2014. *Revista Brasileira de Meteorologia*. [online]. vol. 31, n. 3, p. 366-373, 2016. [ISSN 0102-7786].

GAFFEN, D. J.; WLLIOTT, W. P.; ROBOK, A. Relationships between tropospheric water vapor and surface temperature as observed by radiosondes. *Geophysical Research Letters*, v. 19, n. 18, p. 1839-1842, 1992.

GALVANI, E.; DE LIMA, N. G. B.; ALVES, R. R. Variabilidade e tendência das precipitações no litoral sul de São Paulo. *Revista Geonorte*, v. 3, n. 8, p. 1163-1176, 2012.

GOOSSENS, C.; BERGER, A. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. *Journal of Geophysical Research*, Washington-EUA, v. 92, n. 11, p.13345-13372, Out. 1987.

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. dos S. Geomorfologia Ambiental. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 2006.

HAMED, K.H.; HAO, A. R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 294, 182-196, 1998.

HARDY, J. T. Climate Change. Causes, effects and solutions. John Wiley & Sons. 260 p. June, 2003. isbn: 978-0-470-85019-0

HIGGINS, R. W.; MO, K. C.; SCHUBERT, S. D. The moisture of the central United States in spring as evaluated in the NCEP/NCAR and the NASA/DAO reanalyses. *Monthly Weather Review*, v. 124, p. 939-963, 1996.

IPCC: Summary for policymakers. In: SOLOMON, S. et al. (Ed.). Climate change, 2007: the physical science basis; contribution of working group to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge (UK) and New York: Cambridge University Press, 2007A.

IPCC: Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of working group to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2013.

IPCC: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva: World Meteorological Organization, 2018.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; *et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 77, n. 3, p. 437-471, 1996.

KENDALL, M. G. Rank Correlation Methods. *Griffin*, London, 1975.

KISTLER R.; KALNEY, E.; COLLINS, W.; SAHA, S.; et al. The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 82, n. 2, p. 247-267, 2001.

KOULALI, A.; OUAZAR, D.; BOCK, O.; FADIL, A. Study of seasonal-scale atmospheric water cycle with ground-based GPS receivers, radiosondes and NWP models over Morocco. *Atmospheric Research*, v. 104-105, p. 273–291, 2012.

LIMA, J. G. A.; VIANA, P. C.; WANDERLEY, J. A. C.; MANIÇOSA, R. M.; LIMA, R. M. S. Análise de tendências na temperatura e precipitação em Caicó, Rio Grande Do Norte. *Revista Agropecuária Científica no Semiárido*, v. 8, n. 1, p. 34-38, 2012. [ISSN 1808-6845]

LIMEIRA, Rodrigo César. Variabilidade e tendência das chuvas no Estado da Paraíba. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Tese de doutorado. Universidade Federal De Campina Grande, Centro de Tecnologia E Recursos Naturais, Campina Grande-PB, 122 F, 2008.

LOPES, J. R. F.; SILVA, D. F. Aplicação do teste de Mann-Kendall para análise de tendência pluviométrica no Estado do Ceará. *Revista de Geografia (UFPE)*, v. 30, n. 3, p. 192-208, 2013.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, v.13, n. 3, p.245-259, 1945.

MARGARIDO, M. A.; JUNIOR., H. DE M. Teste para mais de uma raiz unitária: uso do software SAS na elaboração de uma rotina para o teste Dickey-Pantula. *Pesquisa & Debate*, v. 17, p. 149-170, 2006.

MEARS, C. A.; SANTER, B. D.; WENTZ, F. J.; TAYLOR, K. E. Realationship between temperature and precipitable water changes over tropical oceans. *Geophysical Research Letters*, v. 34, p. 1-5, 2007

MENDES, M.; PALA, A. Type I error rate and power of three normality tests. *Pakistan, Journal of Information and Technology*, v. 2, n. 2, 135-139, 2003.

MENEZES, F. P.; FERNANDES, L. L. Análise de tendência e variabilidade da precipitação no Estado do Pará. *Enciclopédia Biosfera*, v. 13, p. 1580-1591, 2016.

MO, K. C.; HIGGINS, R. W. Large-scale atmospheric moisture transport as evaluated in the NCEP/NCAR and the NASA/DAO reanalyses. *Journal of Climate*, v. 9, p. 1531-1545, 1996.

NÓBREGA, R. S.; CAVALCANTI, E. P. Variabilidade sazonal e intra-anual da reciclagem de vapor d'água no Brasil. *Revista de Geografia (Recife)*, v. 27, p. 169-184, 2010.

OZTUNA, D. ; ETHAN, A. H.; TUCCAR, E. Investigation of four different normality tests in terms of type I error rate and power under different distributions. *Turkish Journal of Medical Science*, v.36, n. 3, p. 171-176, 2006.

PENEREIRO, J. C.; FONTOLAN, M. R.; MESCHIATTI, M. C.; FERREIRA, D. H. L. Caracterização estatística de tendências em séries anuais de dados hidro-climáticos no Estado de São Paulo. *Revista Geográfica Acadêmica*, v. 6, p. 52-64, 2012.

PENEREIRO, J. C.; ORLANDO, D. V. Análises de tendências em séries temporais anuais de dados climáticos e hidrológicos na bacia do Rio Parnaíba entre os Estados do Maranhão e Piauí/Brasil. *Revista Geográfica Acadêmica*, v. 7, n. 2, p. 5-21, 2013.

PENEREIRO, J. C.; FERREIRA, D. L. Testes estatísticos e questões ambientais no ensino de engenharia: uma aplicação à climatologia. *Revista de Ensino de Engenharia*, v. 31, n. 2, 2014.

PEREIRA, A. R.; COSTA, A. DE S.; OLIVEIRA, V. G.; BORGES, P. F.; FILHO, A. I. Análise do comportamento das médias anuais da precipitação pluvial e temperatura da cidade de Areia, Paraíba. *Gaia Scientia*, v. 9, n. 1, 2015.

PETTITT, A. N. A non-parametric approach to change point problem. *Journal of Applied Statistics.*, London v. 28, n. 2 p.126-135, 1979.

QUEIROZ, Marise Aparecida. Avaliação de tendências em séries de precipitação diária máxima anual na faixa central do Estado de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte. 202 p., 2013.

RAZALI, N. M.; WAH, Y. B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, v. 2, p. 21-33, 2011.

RIENECKER, M. M.; SUAREZ, M. J.; GELARO, R.; R., LUCCHESI, R., MOLOD, A. *et. al.*. MERRA: NASA's Modern-Era retrospective analysis for research and applications. *Journal of Climate*, n. 24, p. 3624-3648, 2011.

RODRIGUES, J.; DE ÁVILA RODRIGUES, R.; BARBOSA JUSTINO, F. *et.al.* Efeitos locais e de larga escala na dinâmica climática do município de Viçosa-Minas Gerais. *Sociedade & Natureza*, v. 22, n. 3, p. 593-610, 2010.

ROSENZWEIG, C.; SOLECKI, W.; HAMMER, S. A.; MEHROTRA, S. Cities lead the way in climate-change action. *Nature*, v. 467, p. 909-911, 2010. (doi:10.1038/467909a)

ROSENZWEIG, C., SOLECKI, W.; MEHROTRA, S. *et.al.* ARC3.2 Summary for city leaders- climate change and cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network. *Urban Climate Change Research Network*, Columbia University, 2015.

SAHA, S.; MOORTHY, S.; PAN, H. L.; *et. al.* The NCEP climate forecast system reanalysis. *American Meteorological Society*, v. 91, p. 1015-1057, 2010.

SAID, S. E.; DICKEY, D. A. Testing for unit roots in autoregressive moving average models of unknown order. *Biometrika*, p.71, 599-607, 1984.

SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 1, 64-73, 2016.

SANTOS, C. A.; DE LIMA, A. M. M.; FARIAS, M. H. C. S.; AIRES, U. R. V.; DE OLIVEIRA SERRÃO, E. A. Análise estatística da não estacionariedade de séries temporais de vazão máxima anual diária na bacia hidrográfica do Rio Pardo. *Holos*, v. 7, p. 179-193, 2016.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, p. 591-611, 1965.

SHARKEY, P.; KILLICK, R. Nonparametric methods for online changepoint detection. *Lancaster Univ*, Lancaster - UK. 2014.

SILVA, V. P. R. On climate variability in northeast of Brazil. *Journal of Arid Environments*, v. 58, n. 4, p. 575-596, 2004.

STÜKER, E.; SCHUSTER, C. H.; SCHUSTER, J. J.; SANTOS, D. C.; *et. al.* Comparação entre os dados de vento das reanálises meteorológicas ERA-Interim e CFSR com os dados das estações automáticas do INMET no Rio Grande do Sul. *Revista Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 38, ed. especial. p. 284-290, 2016.

SUDRADJAT, A.; FERRARO, R. R.; FIORINO, M. A comparison of total precipitable water between Reanalyses and NVAP. *Journal of Climate*, v. 18, n. 11, p. 1790-1807, 2005.

ULIANA, E. M.; REIS, E. F.; SILVA, J. G. F.; XAVIER, A. C. Precipitação mensal e anual provável para o Estado do Espírito Santo. *Irriga, Botucatu*, v. 18, n. 1, p. 139-147, 2013.

VEZZOLI, R.; PECORA, S.; ZENONI, E. Data analysis to detect inhomogeneity, change points, trends in observations: an application to Po river discharge extremes. *Research Papers Issue, Technical report*. CMCC; 2012.

VEY, S.; DIETRICH, R.; RÜLKE, A.; FRITSCHKE, M.; *et. al.*. Validation of precipitable water vapor within the NCEP/DOE Reanalysis using global GPS observations from one decade. *Journal of Climate*, v. 23, n. 7, p. 1675-1695, 2010.

YUE, S.; PILON, P. J.; PHINNEY, B.; CAVADIAS, G. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Process*, v.16, p. 1807-1829, 2002.

ZHANG, W; YAN, Y; ZHENG, J; LI, L; DONG, X; CAI, H. Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River Delta region, China. *Global and Planetary Change*, v. 69, p. 35-47. 2009.

