

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

MARIANA CAVALCANTE DA SILVA

**COMPARAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR DUAS DIFERENTES
ANÁLISES GRADEADAS DE ALTA RESOLUÇÃO PARA O NORDESTE DO
BRASIL**

MACEIÓ – AL
OUTUBRO - 2024

MARIANA CAVALCANTE DA SILVA

**COMPARAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR DUAS DIFERENTES
ANÁLISES GRADEADAS DE ALTA RESOLUÇÃO PARA O NOREDESTE DO
BRASIL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para o grau de mestre em Meteorologia.

Orientador: Professor: Heliofabio Gomes Barros

Coorientador: Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva

MACEIÓ – AL
OUTUBRO - 2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale – CRB4 - 661

S586c Silva, Mariana Cavalcante da.
Comparação da evapotranspiração por duas diferentes análises gradeadas de alta resolução para o Nordeste do Brasil / Mariana Cavalcante da Silva. – 2025.
65 f.: il.

Orientador: Heliofabio Gomes Barros.
Coorientador: Fabrício Daniel dos Santos Silva.
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 59-65.

1. Brasil, Nordeste – Clima. 2. Evapotranspiração. 3. MODGroETa, 4. ERA5Land.
I. Título.

CDU: 551.5(812/813)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-208.

***“COMPARAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO CALCULADA E ESTIMADA POR DIFERENTES ANÁLISES
GRADEADAS DE ALTA RESOLUÇÃO PARA O NORDESTE DO BRASIL.”***

MARIANA CAVALCANTE DA SILVA

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

Documento assinado digitalmente
gov.br **HELIOFABIO BARROS GOMES**
Data: 30/10/2024 20:20:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
gov.br **FABRICIO DANIEL DOS SANTOS SILVA**
Data: 09/01/2025 10:53:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva
(Coorientador)

Documento assinado digitalmente
gov.br **GLAUBER LOPES MARIANO**
Data: 31/10/2024 09:01:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Glauber Lopes Mariano
(Membro Interno)

Documento assinado digitalmente
gov.br **JANNAYLTON EVERTON OLIVEIRA SANTOS**
Data: 30/10/2024 17:00:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jannaylton Everton Oliveira Santos
(Membro Externo)

OUTUBRO/2024

RESUMO

A Evapotranspiração (ET) é a segunda variável mais importante do ciclo hidrológico, perdendo em importância apenas para a precipitação, e influencia inúmeros processos da atmosfera. Desta forma, é importante estudar as mudanças desta variável no Nordeste Brasileiro (NEB), e avaliar a destreza de diferentes conjuntos de dados que estimam a ET para o NEB. Uma análise climatológica da ET observada entre 1961-2020 evidenciou a sazonalidade dessa variável, com seu comportamento variado na região de acordo com os períodos de maior demanda atmosférica por água do sistema solo-planta. Ao se aplicar análise de cluster, observou-se que a melhor divisão se dá para seis grupos homogêneos de ET no NEB. Para cada um desses grupos, notou-se tendências positivas de ET ao longo dos 60 anos de dados observados analisados, porém com diferentes períodos de mudanças estruturais das séries temporais, com três grupos apresentando-a na década de 1970 e outros três grupos na década de 1990. Em relação a avaliação de dois conjuntos de dados que estimam a ET, um baseado em sensoriamento remoto, o MODGroETa e o outro em reanálise, ERA5Land, mostra-se que essa última apresenta maiores correlações e menores erros em relação a primeira, principalmente após uma análise detalhada e posterior correção dos vieses observados no período de análise, que se deu de 2000 a 2018 na escala de tempo decenal.

Palavras-chave: climatologia, agrupamento, tendência, MODGroETa, ERA5Land.

ABSTRACT

Evapotranspiration (ET) is the second most important variable in the hydrological cycle, second only to precipitation, and influences numerous atmospheric processes. It is therefore important to study changes in this variable in the Brazilian Northeast (NEB), and to assess the accuracy of different data sets that estimate ET for the NEB. A climatological analysis of ET observed between 1961-2020 showed the seasonality of this variable, with its behavior varying in the region according to the periods of greatest atmospheric demand for water from the soil-plant system. When applying a cluster analysis, it was observed that the best division is for six homogeneous ET groups in the NEB. For each of these groups, there were positive trends in ET over the 60 years of observed data analyzed, but with different periods of structural changes in the time series, with three groups presenting it in the 1970s and another three groups in the 1990s. The evaluation of two sets of data that estimate ET, one based on remote sensing, MODGroETa, and the other on reanalysis, ERA5Land, shows that the latter has higher correlations and lower errors compared to the former, especially after a detailed analysis and subsequent correction of the biases observed in the period of analysis, which was from 2000 to 2018 on the decadal time scale.

Keywords: climatology, clustering, trend, MODGroETa, ERA5Land.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO NORDESTE DO BRASIL COM A DELIMITAÇÃO DOS ESTADOS (SIGLAS) E REGIÃO SEMIÁRIDO (CONTORNO AZUL). AUTOR (2023).	23
FIGURA 2 - À ESQUERDA, DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS 96 ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS CONVENCIONAIS DO INMET NO NORDESTE DO BRASIL. À DIREITA, PONTOS EXTRAÍDOS DA ANÁLISE GRADEADA DE XAVIER PARA CADA MUNICÍPIO (PONTOS AZUIS) E PONTOS DE GRADE ADICIONAIS PARA MELHOR COBERTURA ESPACIAL (PONTOS VERMELHOS). AUTOR (2023).	25
FIGURA 3 - CLIMATOLOGIA MENSAL DA ET (MM/DIA/MÊS) NO NORDESTE DO BRASIL. PERÍODO: 1961-2020.	34
FIGURA 4 - DIFERENÇA MÉDIA MENSAL DA ET (MM/DIA/MÊS) NO NORDESTE DO BRASIL, PARA O PERÍODO 1991-2020 EM RELAÇÃO AO PERÍODO 1961-1990.	35
FIGURA 5 - NÚMERO DO CLUSTER (A) E DENDROGRAMA (B) REFERENTES AOS SEIS GRUPOS COM BASE NA ETO MENSAL, CONSIDERANDO A DISTÂNCIA EUCLIDIANA E O MÉTODO DE CONEXÃO WARD, PARA A NEB DE 1961 A 2020.	36
FIGURA 6 - SUB-REGIÃO SEGUNDO A ET MENSAL DISTRIBUÍDA NO NEB, DEFINIDAS COM A LOCALIZAÇÃO DOS GRUPOS HOMOGÊNEOS.	38
FIGURA 7 - ET DIÁRIA MÉDIA MENSAL OBTIDA DO CONJUNTO DE ELEMENTOS PARA CADA GRUPO HOMOGÊNEO NO NEB.	39
FIGURA 8 - ET DIÁRIA MÉDIA ANUAL OBTIDA DO CONJUNTO DE ELEMENTOS PARA CADA GRUPO HOMOGÊNEO NO NEB.	39
FIGURA 9 - SÉRIE TEMPORAL DAS MÉDIAS DIÁRIAS ANUAIS DA ET, PARA 1961-2020 E RESPECTIVA LINHA DE TENDÊNCIA UTILIZANDO O TESTE MK PARA G1. NO PAINEL INFERIOR, PARA OS PERÍODOS CLIMATOLÓGICOS 1961-1990 (ESQUERDA) E 1991-2020 (DIREITA).	42
FIGURA 10 - SÉRIE TEMPORAL DAS MÉDIAS DIÁRIAS ANUAIS DA ET, PARA 1961-2020 E RESPECTIVA LINHA DE TENDÊNCIA UTILIZANDO O TESTE MK PARA G2. NO PAINEL INFERIOR, PARA OS PERÍODOS CLIMATOLÓGICOS 1961-1990 (ESQUERDA) E 1991-2020 (DIREITA).	43
FIGURA 11 - SÉRIE TEMPORAL DAS MÉDIAS DIÁRIAS ANUAIS DA ET, PARA 1961-2020 E RESPECTIVA LINHA DE TENDÊNCIA UTILIZANDO O TESTE MK PARA G5. NO PEINEL INFERIOR, PARA OS PERÍODOS CLIMÁTICOS 1961-1990 (ESQUERDA) E 1991-2020 (DIREITA).	44
FIGURA 12 - SÉRIE TEMPORAL DAS MÉDIAS DIÁRIAS ANUAIS DA ET, PARA 1961-2020 E RESPECTIVA LINHA DE TENDÊNCIA UTILIZANDO O TESTE MK PARA G4. NO PAINEL INFERIOR, PARA OS PERÍODOS CLIMATOLÓGICOS 1961-1990 (ESQUERDA) E 1991-2020 (DIREITA).	44

FIGURA 13 - SÉRIE TEMPORAL DA MÉDIAS ANUAIS DA ET, PARA 1961-2020 E RESPECTIVA LINHA DE TENDÊNCIA UTILIZANDO O TESTE MK PARA G5. NO PAINEL INFERIOR PARA OS PERÍODOS CLIMATOLÓGICOS 1961-1990 (ESQUERDA) E 1991-2020 (DIREITA).....	45
FIGURA 14 -- SÉRIE TEMPORAL DAS MÉDIAS DIÁRIAS ANUAIS DA ET, PARA 1961-2020 E RESPECTIVA LINHA DE TENDÊNCIA UTILIZANDO O TESTE MK PARA G6. NO PAINEL INFERIOR, PARA OS PERÍODOS CLIMATOLÓGICOS 1961-1990 (ESQUERDA) E 1991-2020 (DIREITA).	45
FIGURA 15 - TESTE DE PETTITTT APLICADO A SÉRIE TEMPORAL DA MÉDIA DIÁRIA ANUAL DE ET DO G1, NO PERÍODO 1961-2020. A CURVA AZUL É RELATIVA A UM AJUSTE POLINOMIAL DE ORDEM 6 AOS DADOS, COM RESPECTIVA MANCHA DE $\pm 2,5$ DESVIOS PADRÃO. A LINHA PONTILHADA VERMELHA REPRESENTA O ANO DO PONTO DE MUDANÇA, K, IDENTIFICADO NO TESTE, NESSE CASO: 1991.....	47
FIGURA 16 - MESMO DA FIGURA 15, MAS PARA G2. A LINHA PONTILHADA VERMELHA REPRESENTA O ANO DO PONTO DE MUDANÇA, K, IDENTIFICADO NO TESTE, NESSE CASO: 1975. 48	48
FIGURA 17 - MESMO DA FIGURA 15, MAS PARA G3. A LINHA PONTILHADA VERMELHA REPRESENTA O ANO DO PONTO DE MUDANÇA, K, IDENTIFICADO NO TESTE, NESSE CASO: 1992. 48	48
FIGURA 18 - MESMO DA FIGURA 15, MAS PARA G4. A LINHA PONTILHADA VERMELHA REPRESENTA O ANO DO PONTO DE MUDANÇA, K, IDENTIFICADO NO TESTE, NESSE CASO: 1978. 49	49
FIGURA 19 - MESMO DA FIGURA 15, MAS PARA G5. A LINHA PONTILHADA VERMELHA REPRESENTA O ANO DO PONTO DE MUDANÇA, K, IDENTIFICADO NO TESTE, NESSE CASO: 1978. 49	49
FIGURA 20 - MESMO DA FIGURA 15, MAS PARA G6. A LINHA PONTILHADA VERMELHA REPRESENTA O ANO DO PONTO DE MUDANÇA, K, IDENTIFICADO NO TESTE, NESSE CASO: 1992. 50	50
FIGURA 21 - MÉDIAS DE ET NO PERÍODO 2000-2018 OBTIDAS DA OBSERVAÇÃO (ESQUERDA), MODGroETA (CENTRO) E ERA5LAND (DIREITA), PARA O PRIMEIRO DECÊNIO DE JANEIRO (PAINEL SUPERIOR), SEGUNDO DECÊNIO (PAINEL INTERMEDIÁRIO) E TERCEIRO DECÊNIO (PAINEL INFERIOR).....	52
FIGURA 22 - MÉDIAS DE ET NO PERÍODO 2000-2018 OBTIDAS DA OBSERVAÇÃO (ESQUERDA), MODGroETA (CENTRO) E ERA5LAND (DIREITA), PARA O PRIMEIRO DECÊNIO DE JULHO (PAINEL SUPERIOR), SEGUNDO DECÊNIO (PAINEL INTERMEDIÁRIO) E TERCEIRO DECÊNIO (PAINEL INFERIOR).....	53
FIGURA 23 - VIÉS MÉDIO DECENDIAL DO MODGroETA (ESQUERDA) E ERA5LAND (DIREITA).	54
FIGURA 24 - CORRELAÇÃO DECENDIAL DO MODGroETA ANTES DA CORREÇÃO DE VIÉS (ESQUERDA) E APÓS CORREÇÃO DE VIÉS (DIREITA).	56

FIGURA 25 - CORRELAÇÃO DECENDIAL DO ERA5LAND ANTES DA CORREÇÃO DE VIÉS (ESQUERDA) E APÓS CORREÇÃO DE VIÉS (DIREITA).	56
FIGURA 26 - MAE DECENDIAL DO MODGroETA ANTES DA CORREÇÃO DE VIÉS (ESQUERDA) E APÓS CORREÇÃO DE VIÉS (DIREITA).	57
FIGURA 27 - MAE DECENDIAL DO ERA5LAND ANTES DA CORREÇÃO DE VIÉS (ESQUERDA) E APÓS CORREÇÃO DE VIÉS (DIREITA).	57
FIGURA 28 - RMSE DECENDIAL DO MODGroETA ANTES DA CORREÇÃO DE VIÉS (ESQUERDA) E APÓS CORREÇÃO DE VIÉS (DIREITA).	58
FIGURA 29 - RMSE DECENDIAL DO ERA5LAND ANTES DA CORREÇÃO DE VIÉS (ESQUERDA) E APÓS CORREÇÃO DE VIÉS (DIREITA).	58

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - FONTE DE DADOS, RESPECTIVA RESOLUÇÃO DA GRADE, PERÍODO TOTAL DE DADOS DISPONÍVEIS, METODOLOGIA E PRINCIPAL REFERÊNCIA.	29
TABELA 2 - FREQUÊNCIA ABSOLUTA E RELATIVA DO NÚMERO DE ESTAÇÕES PERTENCENTES AS SUB-REGIÕES HOMOGÊNEAS DETERMINADAS SEGUNDO A PRECIPITAÇÃO MENSAL PARA A BLA.	37
TABELA 3 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA ET (MM/DIA) NAS SEIS REGIÕES HOMOGÊNEAS DO NEB PARA O PERÍODO 1961-2020.	40
TABELA 4 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA ET (MM/DIA) NAS SEIS REGIÕES HOMOGÊNEAS DO NEB PARA O PERÍODO 1961-1990.	40
TABELA 5 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA ET (MM/DIA) NAS SEIS REGIÕES HOMOGÊNEAS DO NEB PARA O PERÍODO 1991-2020.	41
TABELA 6 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS PRINCIPAIS DO TESTE DE MANN-KENDALL NOS TRÊS PERÍODOS CLIMÁTICOS ANALISADOS, PARA AS SEIS REGIÕES HOMOGÊNEAS DE VELOCIDADE DO VENTO DO NEB.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADW	Atonomous Data Warehouse
AL	Alagoas
BA	Bahia
CE	Ceará
DOL	Distúrbios Ondulatórios de Leste
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ENOS	El Niño Oscilação Sul
ERA	European ReAnalysis
ET	Evapotranspiração
ETC	Evapotranspiração de Cultura
ETP	Evapotranspiração de Referncia
ETR	Evapotranspiração Real
FAO	Food And Agriculture Organization
GI	Gro Intelligence
IDW	Inverse Distance Weigttd
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
KC	Coefficiente de cultura
MA	Maranhão
MAE	Erro médio absoluto
MK	Menn-Kendall
NASA	National Aeronautics and Space Administration

NEB	Nordeste Brasileiro
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PB	Paraíba
PE	Pernambuco
PI	Piauí
PM	Pnman-Monteith
PNM	Pressão ao Nível Médio do Mar
r	Coeficiente de correlação de Pearson
RMSE	Root Mean Squared Error
RN	Rio Grande do Norte
SE	Sergipe
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithms for Land
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
ZCIT	Zona de Convergência Intertropica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO-----	11
1.1 OBJETIVO GERAL -----	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -----	14
2.1 SISTEMAS METEOROLÓGICOS QUE ATUAM NO NEB E EVENTOS EXTREMOS-----	14
2.2 MODOS DE VARIABILIDADE CLIMÁTICA E INFLUÊNCIA NO NEB -----	16
2.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO: CONCEITOS E TIPOS -----	17
2.3.1 Evapotranspiração de referência (ET _o) -----	17
2.3.2 Evapotranspiração potencial (ETP)-----	18
2.3.3 Evapotranspiração real (ETR)-----	18
2.3.4 Evapotranspiração da cultura (ETC) -----	18
2.3.5 Métodos de cálculo e incertezas na obtenção de ET -----	19
2.4 ESTUDOS QUE ABORDARAM ANÁLISE DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO NEB -----	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS -----	22
3.1 ÁREA DE ESTUDO-----	22
3.2 DADOS OBSERVADOS NO NEB-----	23
3.3 REANÁLISE ERA5 LAND -----	25
3.4 MODGroETA-----	26
3.5 IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES HOMOGÊNEAS VIA ANÁLISE DE AGRUPAMENTO -----	27
3.6 METODOLOGIA DE INTERCOMPARAÇÃO ENTRE AS FONTES DE DADOS DE ET _o -----	28
3.7 ANÁLISE DE TENDÊNCIAS DE SÉRIES TEMPORAIS-----	31
3.7.1 Teste não-paramétrico de Mann-Kendall (MK) -----	31
4 RESULTADOS -----	33
4.1 CLIMATOLOGIA DA ET NO PERÍODO 1961-2020 -----	33
4.2 ANÁLISE DE GRUPAMENTO -----	35
4.3. ANÁLISE DE TENDÊNCIA E TESTE DE PETTIT DA ET NO NEB DE 1961 A 2020-----	40
4.4. ANÁLISE ESTRUTURAL DAS SÉRIES TEMPORAIS USANDO O TESTE DE PETTITT -----	46
4.5. ANÁLISE DA ET ESTIMADA PELO MODGroETA E ERA5LAND-----	50
5 CONCLUSÕES-----	59

1 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) é a segunda maior componente do ciclo hidrológico global desempenhando um papel importante no elo entre os ciclos globais de energia e água (TRENBERTH et al., 2007; TRENBERTH et al., 2009; YU et al., 2022).

Cabral Júnior et al (2021) afirmam que a ET é a perda simultânea de água por evaporação do solo e transpiração das plantas (OMETTO, 1981), controlando o balanço de água em superfície consumindo dois terços da precipitação terrestre global (FISHER et al., 2017; BHATTAARAI et al., 2017a, 2017b). A ET é geralmente observada por meio de técnicas como as dos tanques evaporimétricos, medidores de fluxo de seiva, lisímetros de pesagem, isótopos estáveis, método da razão de Bowen, sistemas de covariância turbulenta (Eddy Covariance-EC) e cintilometria (LIU et al., 2022).

No entanto, todos esses métodos fornecem estimativas pontuais da ET, não fornecendo dados espaciais de ET para estudos em maiores escalas, como bacias e continentes. Em um País de dimensões continentais como o Brasil, a base observada de longo prazo da ET está restrita a distribuição espacial de estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que vem sendo restringida continuamente devido ao fechamento das mesmas por diferentes motivos, sendo o principal deles a escassez de observadores meteorológicos (CARVALHO, 2020).

Outro problema que afeta as estimativas baseadas em estações no Brasil é o alto percentual de falhas nas séries temporais de temperatura, velocidade do vento, umidade relativa, entre outras variáveis importantes para estimar a ET (COSTA et al., 2021). Logo, por demandar medidas confiáveis e contínuas de dados de superfície, que nem sempre estarão disponíveis, o avanço do sensoriamento remoto pode fornecer as informações em relação à superfície e atmosfera necessárias para estimar a ET em uma alta resolução espacial e em escala temporal suficiente, ao menos superior a vinte anos de estimativas em escala global (ZHANG et al., 2016; HAN et al., 2021).

Responsável por devolver a atmosfera 60% de toda água precipitada, sua variação influencia a distribuição da precipitação e a disponibilidade hídrica em geral (ZENG et al., 2014; ZHANG et al., 2016; JIN et al., 2017). Com forte componente energética, as variações da ET também influenciam no fluxo de calor latente impactando na temperatura da superfície via distribuição de calor sensível, uma vez que em ambientes úmidos mais de 80% da energia

pode ser utilizada apenas para favorecer a mudança de fase da água de líquido para vapor (VOURTILIS et al., 2002; JUNG et al., 2010; TABARI et al., 2011; JIN et al., 2017; LIU et al., 2019; SANTOS et al., 2020).

Além de todo o exposto sobre a importância da ET, há outras duas frentes de pesquisa onde a obtenção de dados confiáveis de ET fazem-se fundamentais: no estudo das secas e nas mudanças climáticas globais. Com foco na região Nordeste do Brasil (NEB), Costa et al., (2020) mostraram que existe uma tendência predominantemente positiva no aumento das temperaturas, principalmente das temperaturas mínimas, diminuindo a amplitude térmica diária, o que deve provocar diretamente um aumento da ET desta região, e que esta tendência continua para diferentes cenários futuros de mudanças climáticas (MARENGO et al., 2021). No caso do Nordeste, que tem a maior parte de sua área inserida no clima semiárido, o aumento na ETP associado a já conhecida alta variabilidade espaço-temporal da precipitação, pode prejudicar ainda mais as atividades agrícolas, notadamente as de sequeiro, por meio da ocorrência mais frequente de episódios secos (MARENGO et al., 2016; ALVALÁ et al., 2017; MARENGO et al., 2017; BRITO et al., 2017).

Em 2021, alertas de secas severas foram emitidos em diferentes regiões do mundo, como Europa, África e Brasil, em um contexto de intensificação desse fenômeno em escala global (POKHREL et al., 2021; YANG et al., 2021). Como peça fundamental na caracterização de uma seca, mais pesquisas sobre ET merecem atenção especial, notadamente em regiões como o NEB, onde a seca é fenômeno natural recorrente (DA ROCHA JUNIOR et al., 2020).

Cientes da necessidade de dados confiáveis de ET para condução de pesquisas climáticas e de que a rede de monitoramento atual operada pelo INMET não é suficiente para caracterizar os diferentes microclimas que são inerentes a uma vasta região como o NEB, tratar-se-á nessa dissertação de pesquisar sobre a eficiência de estimativas de ET disponibilizadas por duas diferentes fontes de dados, o MODGroETa fundamentado em estimativas de sensoriamento remoto desenvolvido pelo Gro-Intelligence (GI) usando a base teórica do produto MODIS Global Evapotranspiration (MOD16). A segunda fonte de dados de ET é proveniente da reanálise ERA5-Land, que representa um conjunto de variáveis de superfície sobre continentes ao longo de várias décadas. Essas duas fontes de dados de ET serão avaliadas mediante comparações com a ET oriunda da análise gradeada disponibilizada por Xavier et al. (2022), que representará a verdade em superfície devido a sua acurácia em relação a valores obtidos de estações (HERDIES et al., 2023).

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a performance da ET disponibilizada pelo MODGroETa e ERA5-Land para o NEB por meio da comparação com a ET por Xavier et al (2022), no período de 2000 a 2018.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar regiões homogêneas de ET no NEB por meio de uma análise de *cluster*.
- Estudar as mudanças desta variável no NEB nos últimos 60 anos (1961-2020) por meio da análise de tendências não paramétrica de Mann-Kendall nas regiões homogêneas identificadas na análise de *cluster*.
- Avaliar possíveis quebras estruturais da ET no NEB por meio do teste de homogeneidade de Pettitt nas regiões homogêneas identificadas na análise de *cluster*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas Meteorológicos que atuam no NEB e eventos extremos

O clima de qualquer região é determinado em grande parte pela circulação geral da atmosfera, que por sua vez, na região tropical é modulada e modificada pelos padrões termodinâmicos dos oceanos Pacífico e Atlântico Tropical (FERREIRA e MELLO, 2005). Existem alguns mecanismos que governam o regime de chuva da região Nordeste dentre eles podemos destacar: eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS); gradiente meridional da temperatura da superfície do mar (TSM) na bacia do oceano Atlântico; ventos Alísios; pressão ao nível do mar (PNM); zona de convergência intertropical (ZCIT); frentes frias e vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN), (UVO e BERNDTSSON, 1996; SILVA et al., 2008; COSTA et al., 2014; OLIVEIRA e OYAMA, 2019; LYRA et al., 2022; ANJOS e LOPES, 2019).

O aumento contínuo do número de eventos extremos no mundo tem preocupado a comunidade internacional, devido ao tamanho e magnitude de seus impactos, acarretando grandes danos sociais, econômicos e ambientais, afetando os mais vulneráveis (SENEVIRATNE et al., 2012; MISHRA et al., 2015). Esses eventos extremos são causados pela ação humana na natureza, isoladamente ou associada a características ambientais ou regionais, que podem ser classificadas como: hidrológicas, climatológicas, geológicas e meteorológicas (FREITAS et al., 2014). Esses eventos podem ser motivados por mudanças nos padrões dos sistemas climáticos em diferentes escalas de espaço e tempo (MEEHL; TEBALDI, 2004; CAVALCANTI, 2012), variáveis de mudanças climáticas (KAYANO et al., 2013; CORREIA-FILHO et al., 2014), influência geográfica (HOUZE, 2012) ou microclima regional (WILLEMS et al., 2012).

Alguns desses elementos estão ligados às mudanças climáticas, confirmadas por padrões singulares de variáveis termodinâmicas (temperatura e capacidade de armazenamento de água atmosférica) e energéticas (padrão de circulação de ar), que contribuem para o aumento da frequência de eventos extremos e seus impactos (TRENBERTH, 2012; CAVALCANTI, 2012).

Os eventos extremos que ocorrem no Brasil são influenciados por sistemas climáticos, isolados ou combinados, atuando local ou globalmente, muitas vezes associados a fortes chuvas, enchentes ou secas (CAVALCANTI, 2012; MARENGO et al., 2013; MARENGO et al., 2016).

No Nordeste do Brasil (NEB), Costa et al. (2020) mostraram que esses extremos não estão diretamente associados apenas a precipitação, mas também as temperaturas. Em seu estudo, que analisou índices de extremos climáticos no período de 1961 a 2014, a maior parte do NEB apresentou indicadores estatisticamente significantes de aquecimento, com diminuição da amplitude térmica diária, aumento progressivo do número de dias, e principalmente, de noites quentes, além de tendências significativas de aumento de ondas de calor.

Estes resultados estão intrinsicamente interligados com a atuação, ou ausência dos principais sistemas meteorológicos que atuam no NEB. Os VCANs, cuja tempo de vida varia em média de 7 a 10 dias (GAN e KOUSKY, 1982), tem atuação mais frequente de novembro a março com pico em janeiro (KOUSKY e GAN, 1981; MISHRA et al., 2001; BRITO et al., 2011), apresentam nebulosidade convectiva em suas bordas norte e oeste, com centro associado a ausência de nebulosidade, que quando localizada sobre a parte continental, está associada a falta de chuvas por períodos que podem ultrapassar 10 dias e elevadas temperaturas, aumentando as taxas de ET e consequente ressecamento da superfície. Do contrário, geralmente ocorrem chuvas intensas nas bordas desse sistema.

A ZCIT por sua vez é o principal sistema causador de chuvas no norte do NEB, e tem sua maior/menor atuação entre os meses de fevereiro a maio condicionada principalmente pelas anomalias de TSM do Oceano Atlântico. Quando desvios positivos são observados no Atlântico norte, a ZCIT geralmente estará ancorada mais a norte dificultando a ocorrência de chuvas no norte do NEB, com consequente aumento de temperatura e ET. Quando o Atlântico Sul está com desvios positivos, a ZCIT tende a se posicionar mais a sul, levando precipitação ao norte do NEB (CHAVES et al., 2001; MOLION e BERNARDO, 2002; ANDREOLI et al., 2007; RODRIGUES et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2017).

Outro sistema importante para a distribuição de chuvas no NEB são os distúrbios ondulatórios de leste (DOL), associados a perturbações ondulatórias dos ventos alísios induzidas por aquecimento diferencial terra-mar (GOMES et al., 2015; 2019). Esses sistemas atuam no outono/inverno e beneficiam com chuvas abundantes boa parte do setor leste do NEB,

que pode receber um aporte significativo de precipitação representando mais da metade do total pluviométrico anual (NEVES et al., 2016; ESPINOZA et al., 2021; COMIN et al., 2021). Do contrário, sob condições desfavoráveis para atuação de DOLs, o leste do NEB enfrenta escassez de precipitação associada a pouca nebulosidade, levando ao aumento da temperatura e ET.

2.2 Modos de variabilidade climática e influência no NEB

O Oceano Atlântico possui diversos tipos de variabilidade, que interagem no sistema Oceano-Atmosfera. O Dipolo Atlântico Tropical ou Gradiente Inter-hemisférico Tropical Atlântico é uma dessas variações, que aparecem como um padrão. A região sul de TSM apresenta anomalias próximas à bacia do Atlântico Tropical (MOURA e SHUKLA, 1981; SERVAIN, 1993; MURTUGUDDE et al., 2001; WANG, 2010; FOLTZ e MCPHADEN, 2010; ZHANG e ZHANG, 2010). Por se tratar de um padrão de Dipolo, essa variação é dividida em duas fases, apresentadas espacialmente com sinais opostos, que é a fase positiva do Dipolo quando os distúrbios de TSM no Atlântico Norte Tropical são positivos, enquanto os distúrbios de TSM no Atlântico Sul Tropical é negativo. Por outro lado, a fase de Dipolo negativo ocorre quando as anomalias de TSM são negativas no Atlântico Norte Tropical e positivas no Atlântico Sul Tropical (SOUZA e MOURA, 1998).

As primeiras investigações desse processo surgiram na década de 1970. Segundo Hastenrath (1976), a diferença de TSM entre o Atlântico Sul Tropical e o Oceano Atlântico Norte é responsável por alterar a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o Atlântico. Na mesma década, Hastenrath e Heller (1977) definiram o Dipolo Atlântico como uma interface oceano-atmosfera caracterizado por mudanças dramáticas na TSM, ventos de baixo nível e pressão média do nível do mar sobre o oceano Atlântico Tropical. Esses trabalhos foram importantes para entender a influência da TSM no Atlântico Tropical e durante as marés do NEB e serviram de base para outros estudos, que mostraram a influência dos problemas de TSM tanto no Oceano Pacífico quanto no Oceano Atlântico Tropical e o estado da ZCIT, especialmente a ZCIT Atlântica (MOURA e SHUKLA, 1981; UVO et al., 1998; SARAVANAN e CHANG, 2000; PEZZI e CAVALCANTI, 2001; GU e ADLER, 2009).

Com base nos indicadores propostos por Servain (1991), alguns autores pretendem mostrar a importância do Oceano Atlântico Tropical nos recursos hídricos, onde se destacam as atividades que afetam o Dipolo Atlântico na chuva e na vazão do NEB. Das fases negativas do Dipolo, observou-se aumento da vazão na região do São Francisco (CAPOZZOLI et al., 2017). Eventos de chuvas fortes em outras regiões do NEB também têm uma correlação positiva com a fase dipolo negativa na região na estação chuvosa (SANTOS e MANZI, 2011) e pré-

monção (ANDREOLI e KAYANO, 2005). A disponibilidade hídrica no semiárido NEB depende dos reservatórios superficiais e estes são sensíveis às variações de chuva ou ET (CYSNE et al., 2012).

2.3 Evapotranspiração: Conceitos e tipos

De acordo com Cunha et al (2017) a ET é controlada pelo balanço energético, demanda atmosférica e pelo fornecimento de água para a atmosfera através da evaporação do solo e transpiração das plantas, sendo um processo simultâneo de perda de água e transpiração das plantas, correspondendo a um componente climatológico fundamental oposto ao processo de chuva.

A ET é expressa nas mesmas unidades que precipitação (milímetros), usando a altura da lâmina de água. Por exemplo, um milímetro de evapotranspiração é igual a transferir para a atmosfera um litro de água por metro quadrado da projeção horizontal da área. Há quatro conceitos de ET: de referência, potencial, real e da cultura. Esses quatro conceitos são explicados a seguir.

2.3.1 Evapotranspiração de referência (ET_o)

Originalmente, o termo evapotranspiração potencial era utilizado para o processo físico caracterizado pela transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera, sob condições padronizadas, que envolvem uma extensa área de superfície natural coberta com vegetação baixa e uniforme em fase adulta, tradicionalmente grama, com elevado índice de área foliar e em crescimento ativo, com teor de água no solo próximo de sua capacidade de campo (ALLEN et al., 2006). No entanto, essas condições ideais para estimar a ET só são conseguidas mediante experimentação de campo, em condições devidamente controladas. Diante disso, Doorenbos e Pruitt (1977) introduziram para essas condições o termo "evapotranspiração de referência", dada pela sigla ET seguida do número zero subscrito, um indicador para uma condição de contorno ideal, substituindo o termo comumente usado ETP.

2.3.2 Evapotranspiração potencial (ETP)

Com a definição de que, sob condições de contorno controladas e conhecidas, atendendo todas as recomendações da FAO (1956), tem-se a ETo, a ETP assume a seguinte definição: é a medida da capacidade da atmosfera de remover a água da superfície por meio da evaporação e da transpiração. Ao medir a ETP, assume-se que não há controle no abastecimento de água. A ETP é também definida por alguns autores como a máxima evapotranspiração para as condições atmosféricas especificadas (ALLEN et al., 1998; CAMARGO e CAMARGO, 2000; ADEBOYE et al., 2009; SENTELHAS et al., 2010; CARVALHO et al., 2011). Em resumo, qualquer método que seja utilizado para estimar a ET a partir de medidas obtidas por instrumentação meteorológica, ou até mesmo por lisímetros, desde que não se conheça ou não sejam atendidas as condições de campo padronizadas pela FAO (1956), deve ser considerada como ETP, que é a máxima ET que pode ser obtida em condições naturais.

2.3.3 Evapotranspiração real (ETR)

A ETR é a quantidade de água que é realmente removida de uma superfície pelos processos de evaporação e transpiração, explicando a troca de água e energia entre o solo, a superfície terrestre e a atmosfera (TABARI et al., 2011; CAMPOS et al., 2019; LIU et al., 2022). A evapotranspiração real é difícil de medir. Mas é um processo extremamente importante em ecossistemas naturais. Além disso, é um componente importante do ciclo da água, uma vez que afeta o balanço hídrico. Em situações em que os solos estão secos devido à falta de chuva, a evapotranspiração real se apresenta menor que a potencial, podendo no máximo igualá-la em condições saturadas.

2.3.4 Evapotranspiração da cultura (ETC)

O conceito de ETo foi introduzido para estudar a demanda evaporativa da atmosfera independentemente do tipo de cultura, desenvolvimento da cultura e práticas de manejo. Os únicos fatores que afetam a ETo são os parâmetros climáticos. Consequentemente, ETo é um parâmetro climático e pode ser calculado a partir de dados meteorológicos. A evapotranspiração da cultura sob condições padrão, denotada como ETC, é a evapotranspiração de culturas bem

fertilizadas e livres de doenças, cultivadas em grandes campos, sob condições ótimas de água no solo e alcançando produção total sob as condições climáticas dadas.

A ETC pode ser obtida de forma direta ou estimada (ESCARABAJAL-HENAREJOS et al., 2015a, 2015b). Para medidas precisas de ETC em campo, faz-se necessário uso de lisímetros, instrumentos de pesagem que permitem identificar a real transferência de água do solo e da planta para a atmosfera. No entanto, mediante a dificuldade de utilização de lisímetros em todas as situações, os métodos baseados em coeficientes de cultura (K_c) são amplamente utilizados (ALLEN et al., 2011). Guimaraes e Albuquerque (2004) definem K_c como a razão entre a ET_c e a ET_o . Tais valores de K_c são amplamente conhecidos na literatura científica para aplicação em várias culturas, de forma que a ET_c de uma cultura em qualquer estágio de cultivo pode ser facilmente obtida da relação $ET_c = K_c \times ET_o$. Para mais detalhes sobre a obtenção de valores de K_c para culturas, recomenda-se a leitura de Allen et al. (1998).

2.3.5 Métodos de cálculo e incertezas na obtenção de ET

A ET é um processo importante do ciclo hidrológico. Através do uso do balanço hídrico, é possível medir a recarga da água nas áreas subterrâneas (VALDIVIA, 2005). Muitos métodos foram desenvolvidos para medir a ET, porém poucos são aplicáveis em todas as condições climáticas, o que tem exigido, muitas vezes, correção de coeficientes matemáticos.

Desde mais de 200 anos atrás, os estudiosos têm gradualmente explorado os conceitos e teorias da ET (DALTON, 1802). Devido às complexas restrições de ET regional, incluindo condições meteorológicas, umidade do solo, status de crescimento da vegetação e assim por diante, foi uma variável de difícil estimação por muito tempo (GAO et al., 2017; Y. LIU et al., 2020). Consequentemente, Thornthwaite (1948) e Jensen (1968) propuseram os conceitos de ETP e ETC, respectivamente. Esses valores podem ser utilizados para orientar a irrigação agrícola e alertas de seca em áreas com monitoramento da ETR por coeficientes empíricos (XIANG et al., 2020). No entanto, descrever a relação entre ETR e ETP permanece difícil (Mobilia e Longobardi, 2021), especialmente para áreas mal monitoradas, onde a ligação empírica entre valores reais e potenciais ainda é obscura.

Várias estimativas globais de ET foram desenvolvidas nas últimas 2 décadas com base em várias teorias, incluindo: (1) métodos residuais de balanço de energia de superfície, por exemplo, o produto ET baseado no Sistema de Balanço de Energia de Superfície (CHEN et al., 2021), (2) métodos baseados em equações de Penman–Monteith (PM) e Priestley-Taylor (PT):

MOD16 (MU et al., 2011; ZHANG et al., 2015; ZHANG et al., 2019; MARTENS et al., 2017; MIRALLES et al., 2011), (3) modelos de superfície terrestre, por exemplo, o Global Land Data Assimilation System (GLDAS) (RODELL et al., 2004), (4) abordagens de conjuntos multimodelos, por exemplo, GLASS (YAO et al., 2014), Hi-GLASS (YAO et al., 2017) e um produto ET sintetizado (ELNASHAR et al., 2021) e (5) métodos empíricos, por exemplo, Fluxcom (JUNG et al., 2019). Embora esses produtos ET tenham sido rigorosamente avaliados e amplamente aplicados, existe um desacordo notável entre esses produtos ET. Por exemplo, Mueller et al. (2013) relataram que o valor médio de ET de vários anos recuperado de 40 produtos de ET variou de 423 a 563 mm/ano. Além disso, enquanto a variação interanual em alguns produtos de ET exibiu tendências de mudança semelhantes, tendências inconsistentes ou mesmo contrastantes ocorreram entre esses produtos de ET (KIM et al., 2021). Os fenômenos mencionados acima indicam que permanecem altas as incertezas nas estimativas e produtos de ET (FISHER et al., 2017).

2.4 Estudos que abordaram análise da evapotranspiração no NEB

Na região do Ceará, Almeida et al. (2010) compararam 11 métodos de estimativa de evapotranspiração. Os métodos que funcionaram melhor em comparação com o método padrão de Penman-Monteith FAO-56 (PM FAO-56), foi Blaney e Criddle (1950) e Kimberly-Penman (WRIGHT, 1982). O método de Blaney e Criddle, recomendado pela FAO para medições mensais, requer menos dados meteorológicos do que o método padrão, porém, apresentou um desempenho ruim para a região de Fortaleza. Os métodos Tanque Classe “A” e Makkink (1957) foram os que subestimaram a ETo em Fortaleza-CE em 28%, 16% e 18,37%, respectivamente. Essa subestimação de Makkink também foi encontrada por Turco et al. (2008), o que se explica pelo fato desse método ter sido estabelecido para locais frios, o que o leva a subestimação quando usado em climas quentes.

Ainda para o Ceará, Silva et al (2015) avaliaram a performance das estimativas de ET usando o método de Hargreaves-Samani (1985), comparando os valores com os obtidos pelo método padrão Penman-Monteith FAO-56 (PM-FAO 56). Os resultados, gerados para 12 estações meteorológicas distribuídas em todas as mesorregiões desse Estado variaram de péssimo em uma estação (correlação de 0,32 com os valores obtidos pelo método PM-FAO 56), mau em uma estação (correlação de 0,49), sofrível em duas estações (correlações de 0,59 a

0,60), mediano em duas estações (correlações de 0,64 a 0,65) e bom em seis estações (correlação de 0,67 a 0,74).

Tagliaferre et al. (2010) avaliaram a eficácia dos métodos empíricos de Penman, Radiação Solar, Blaney e Criddle, Hargreaves-Samani, Priestley e Taylor e Turc comparados com o método padrão de PM FAO-56 para as condições meteorológicas do município de Eunápolis-BA. Os resultados permitiram concluir que o método de Blaney e Criddle e Radiação Solar apresentaram melhor desempenho na medição da ETo para todos os períodos estudados pelos autores. Os métodos de Priestley e Taylor e Turc subestimaram os valores de evapotranspiração obtidos pelo método padrão PM FAO-56. O método Hargreaves-Samani funcionou muito mal ao subestimar sistematicamente os valores da ETo de referência.

Souza et al. (2010) determinaram a ETo em Sergipe utilizando diferentes métodos. Os autores concluíram que nas áreas irrigadas do estado, os valores obtidos pelos métodos do Tanque Classe A, Hargreaves-Samani, Priestley e Taylor, Jensen e Haise e Linacre são diferentes, portanto, daqueles obtidos pela norma padrão, que é o método PM FAO 56. Os métodos de obtenção de evapotranspiração que incluem radiação solar líquida são aqueles que apresentam valores mais próximos aos obtidos pelo método PM FAO 56.

Tendências em escalas mensal, anual e interdecadal em áreas agrícolas irrigadas nas microrregiões de Juazeiro e Petrolina, no centro do semiárido do NEB, foram estudadas por Cabral Júnior et al. (2019). Essa região foi estrategicamente escolhida por comportar hoje o principal perímetro irrigado do semiárido nordestino, responsável por colocar o Brasil como um dos principais exportadores de frutas tropicais do mundo. As séries temporais analisadas, de 1976 a 2014, apontaram para tendência de queda significativa da ETo em Juazeiro e Petrolina, da ordem de 14,5 mm/ano e 7,7 mm/ano, respectivamente, ambas com significância estatística, observando ainda que a quebra estrutural das séries ocorreu em 1996, com as tendências sendo observadas a partir desse ano.

Em estudo mais abrangente, Cabral Júnior et al. (2021), por meio de revisão de literatura, concluíram que a estimativa de ETo a partir do algoritmo SEBAL tem eficiência comprovada, com resultados que convergiram às estimativas tradicionais, com a vantagem de permitir sua utilização em uma larga escala geográfica, além da alta resolução espacial e baixo custo. As limitações desse método restringem-se à interferência atmosférica, principalmente nebulosidade, uma vez que esse algoritmo faz uso de imagens de satélites que precisam ter sido coletadas em dias de céu predominantemente claro, com poucas nuvens, o que dificulta logicamente seu uso nos respectivos períodos chuvosos distintos do semiárido.

Silva et al. (2018), analisaram tendências mensais da ETP nas mesorregiões de Alagoas, usando dados das estações meteorológicas convencionais de 1961 a 2016 do INMET. Mostraram que os maiores valores médios diários da ETP ocorrem no sertão, seguido do agreste e litoral, com máximos de outubro a março, e mínimos de abril a setembro. Em níveis sazonal e anual, utilizando o teste sequencial de Mann-Kendall encontraram tendências positivas e estatisticamente significativas no verão apenas para o agreste, assim como no outono, a partir da década de 80. No inverno as três mesorregiões alagoanas convergiram para tendências negativas da ETP. Em resumo, foram observadas tendências em nível anual significantes de decréscimo da ETP no sertão, de aumento no agreste, e neutralidade no litoral.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O Nordeste do Brasil possui uma população por volta de 52 milhões de habitantes, com uma área de aproximadamente 1,56 milhões de km², distribuído entre 9 estados, Bahia (BA), Sergipe (SE), Alagoas (AL), Pernambuco (PE), Paraíba (PB), Rio Grande do Norte (RN), Ceará (CE), Piauí (PI) e Maranhão (MA), compreendendo 1794 municípios (DOS SANTOS et al., 2019), de acordo com a Figura 1. O NEB se encontra numa região equatorial entre os paralelos 1-21°S e os meridianos 32-49°W. A vegetação característica da costa leste é mata atlântica. A vegetação presente na porção central do NEB (região semiárida) é a caatinga. A região de transição entre a caatinga e a mata atlântica é chamada de Agreste. A topografia da região unida a variados sistemas meteorológicos provocam uma grande variabilidade climática. O NEB possui três áreas de variabilidade pluviométrica homogênea: a porção central, o Norte e a parte leste (CAVALCANTE, 2016; MARENGO et al., 2017; ALVALÁ et al., 2017; COSTA et al., 2020). A região do semiárido é caracterizado como a região onde a precipitação anual é menor que 800 mm.

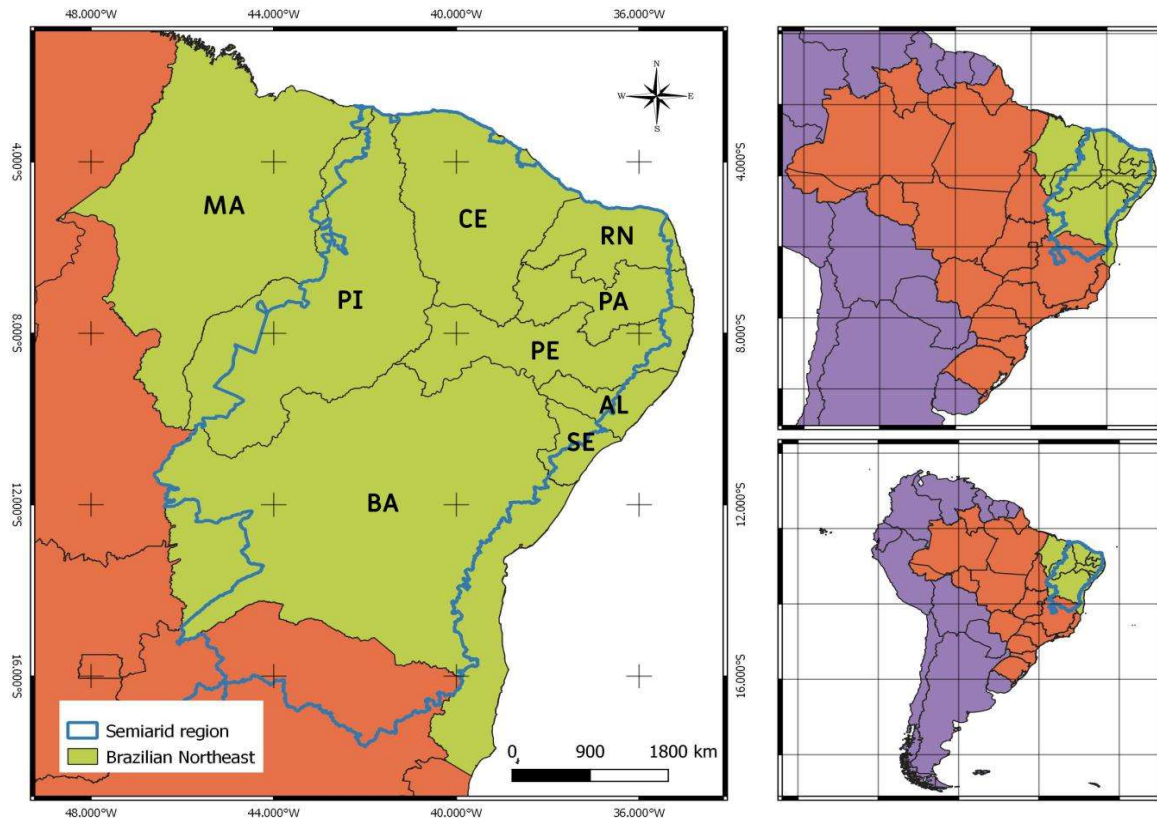


Figura 1 - Mapa de localização do Nordeste do Brasil com a delimitação dos estados (Siglas) e região semiárido (contorno azul). Autor (2023).

3.2 Dados observados no NEB

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) tem 96 estações meteorológicas comuns localizadas na região nordeste, que medem a Precipitação (Prec), e outras variáveis necessárias para calcular a ET: Temperaturas Máxima, Mínima e Média, Umidade Relativa do Ar, Insolação, Pressão Atmosférica e Velocidade Média do Vento a 10 metros de altura, conforme mostrado na Figura 2 (esquerda).

Estes dados, somados a outros obtidos de estações automáticas e outras fontes de dados observados, foram usados para gerar uma análise gradeada de alta resolução espaço-temporal, disponibilizada por Xavier et al. (2022). Como descrito em seu trabalho, todos os dados de precipitação, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar coletados entre 1961 e 2020 foram expostos a um rigoroso controle de qualidade, e em seguida os dados foram interpolados seguindo os melhores resultados obtidos via validação cruzada entre os métodos de ponderação pelo inverso da distância (IDW) e ponderação pela distância angular (ADW), para geração de uma grade em alta resolução de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. Para nos atentar apenas

as variáveis de interesse em nosso estudo, que são a temperatura, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, usadas para o cálculo da ETo, descreveremos de forma sucinta nos parágrafos a seguir a metodologia empregada por Xavier et al (2022). Tais dados permitiram extrair 2069 séries temporais de ETo para o NEB, contemplando todos os municípios da região (Figura 2, à direita).

Para a temperatura, foram construídas duas grades, uma para temperatura máxima e outra para a temperatura mínima. Para a construção dessas grades, foi realizado um ajuste de elevação baseado nas alturas de cada ponto de estação que forneceu dados, baseado no *lapse rate* de temperatura de 0.006 °C/m. Para representar o relevo topográfico do Brasil foi usado o Global Multiresolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010, Danielson and Gesch (2011)), adquirido com resolução espacial de 30" x 30". Para a temperatura máxima, o método de interpolação que ofereceu o melhor resultado para a construção da grade foi IDW e para temperatura mínima o ADW, ambos ajustados pela elevação. Contribuíram para a construção da grade de temperatura dados de 1.375 estações espacialmente distribuídas pelo Brasil. Uma grade para a temperatura média foi obtida simplesmente pela divisão dos valores de máximas e mínimas. Os resultados dessa nova grade ajustada pelo *lapse rate* demonstrou maior correlação e menores erros do que os obtidos pela grade construída e detalhada em Xavier et al (2016), que não possuía essa correção de altitude.

Análogo a construção da grade de temperatura, foram construídas as grades em alta resolução da radiação solar e da velocidade do vento. Para essas variáveis o método de interpolação que se mostrou mais eficiente foi o ADW. A menor performance da radiação solar foi observada na bacia amazônica com correlação de 0,689, e a melhor na área da bacia do rio Uruguai e na região do Atlântico Sul, com correlações de 0,94 e 0,92, respectivamente. Para o NEB, as correlações variaram de 0,91 a 0,94. A umidade relativa e a velocidade do vento apresentaram resultados similares aos da radiação solar.

Os dados da análise gradeada de Xavier foram testados em vários estudos e vem servido como verdade de superfície em diferentes pesquisas (DA SILVA et al., 2018; DA ROCHA JÚNIOR et al., 2019; PAREDES-TREJO et al., 2019; LUCAS et al., 2022; HERDIES et al., 2023; SILVA et al., 2023). Dessa forma, utilizou-se tal análise para extrair as séries temporais de ETo para o NEB mostradas na Figura 2 à direita, que será usada como a base observacional para fins de comparação e avaliação das demais fontes de dados para ETo no NEB.

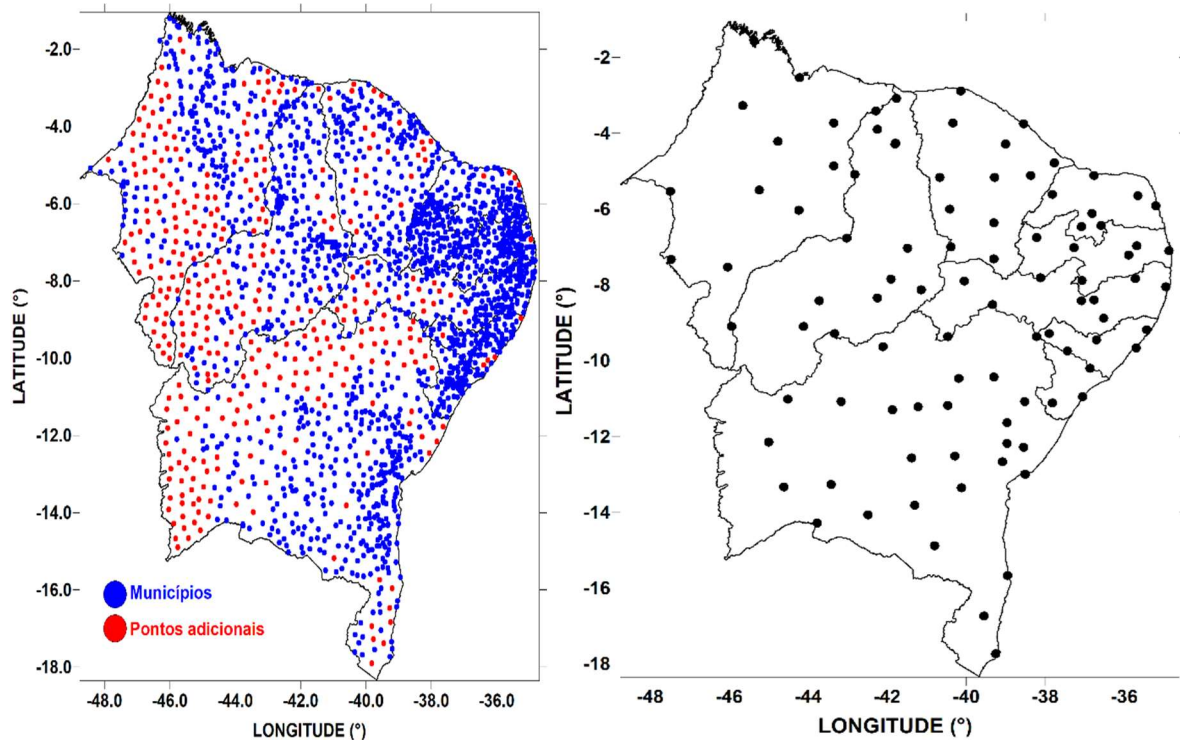


Figura 2 - À esquerda, distribuição espacial das 96 estações meteorológicas convencionais do INMET no Nordeste do Brasil. À direita, pontos extraídos da análise gradeada de Xavier para cada município (pontos azuis) e pontos de grade adicionais para melhor cobertura espacial (pontos vermelhos). Autor (2023).

3.3 Reanálise ERA5 Land

O ERA5-Land é uma evolução da reanálise ERA5, desenvolvida pelo ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) e fornece dados de superfície e em diferentes níveis atmosféricos para todo o período de 1950 ao presente (HERSBACH et al., 2020; MUÑOZ SABATER et al., 2021). Várias melhorias foram aplicadas à reanálise ERA5, notavelmente a resolução foi melhorada para 9 km e sua frequência de tempo é horária, em comparação aos 31 km do ERA5 em escala diária. Três fontes de observações alimentam a nova versão da reanálise ERA5 Land. A primeira é baseada em dados de satélites, a segunda em dados coletados de estações de superfície fornecidos pelo sistema de informações da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e o terceiro em informações de neve observada em códigos SYNOP e procedentes da NOAA/NESDIS IMS (NOAA National Environmental Satellite, Data and Information Service Interactive Multi-Sensor Snow and Ice Mapping System).

Vários sensores a bordo de diferentes satélites fornecem entradas para a estimativa final da temperatura a 2 m da reanálise ERA5-Land, principal variável para o cálculo da ET: sensor AIRS do satélite AQUA (NASA), sensor AMSUA-2 da série NOAA-15/16/17/18/19, AQUA e METOP-A/B (NOAA, ESA, EUMETSAT), sensores ATMS e CRIS dos satélites NPP (NOAA), sensor HIRS dos satélites TIROS-N, NOAA-6/7/8/9/11/14, sensor IASI do satélite METOP-A/B (EUMETSAT/ESA), sensor MSU dos satélites TIROS-N, NOAA-6 a 12, NOAA-14, sensores MWHS2 e MWTS2 do satélite FY-3-C (CMA), sensor MWTS do satélite FY-3A/B (NRSCC), sensor SSMIS do satélite DMSP-16/17/18 (US Navy) e o sensor SSU dos satélites TIROS-N, NOAA-6/7/8/9/11/14 (NOAA).

O ERA5-Land é um produto de assimilação baseado na parte terrestre do ERA5, mas com a grande diferença de ter uma resolução espacial de 9 km (0,1° da grade padrão latitude-longitude), incluindo a correção de altura da região termodinâmica próxima à superfície, ou seja, a orografia da escala de subgrade influencia a pressão atmosférica, bem como outras partes da física, tornando-se a primeira reanálise global a atingir uma resolução tão fina (MUÑOZ SABATER et al., 2021).

Apoiado pelo forçamento climático na subescala ERA5, o ERA5-Land também reduz o erro quadrático médio da temperatura da superfície dado o uso dos dados do sensor MODIS da NASA como linha de base. Isto confere ao ERA5-Land uma eficiência significativa na descrição do ciclo hidrológico e na dinâmica ao nível do solo, especialmente nas regiões costeiras, onde a avaliação da interação entre água e terra requer uma melhor precisão espacial.

No Brasil, alguns estudos já foram realizados utilizando ou avaliando a qualidade dos dados do ERA5-Land com métodos estatísticos em áreas onde informações de superfície são limitadas (BRAGA et al., 2021; ARAÚJO et al., 2022; SILVA et al., 2022). Para essa pesquisa, foram extraídas séries temporais de ET em nível horário para os 2069 pontos no NEB mostrados na Figura 2, a fim de compará-los aos dados de Xavier.

3.4 MODGroETa

O MODGroETa é um modelo de evapotranspiração baseado em sensoriamento remoto desenvolvido pela Gro-Intelligence usando a mesma base teórica do MODIS Global Evapotranspiration (MOD16) que foi desenvolvido pela National Aeronautics and Space Administration (NASA). O sensoriamento remoto tem sido utilizado como um meio viável para

estimar a ET regional devido às suas características espectrais, espaciais e temporais. Dados de sensoriamento remoto obtidos de satélites fornecem séries contínuas quase em tempo real que são úteis no monitoramento de variáveis biofísicas da superfície terrestre que impactam a ET.

A implementação do código MODGroETa satisfaz a necessidade de gerar a ET global quase em tempo real (NRT). O projeto de evapotranspiração MOD16 usa uma combinação de dados meteorológicos e de sensoriamento remoto da superfície do solo e é baseado na equação de Penman-Monteith. Esse produto está disponível para download em resolução de 0,1° com resolução temporal decendial. O algoritmo do modelo MODGroETa é executado em uma escala de tempo diária, somando os fluxos de vapor d'água da evaporação do solo, do dossel úmido e da transpiração de plantas na superfície de dossel seco, que é então agregada a escala decendial, na qual está disponível para o período 1998 a 2018.

3.5 Identificação de regiões homogêneas via análise de agrupamento

Com a distribuição de pontos mostrada na Figura 2, para os dados de ETo obtidos de Xavier, utilizou-se a técnica estatística multivariada conhecida como análise de agrupamento (cluster) para identificar áreas homogêneas baseadas na distribuição mensal da ETo no NEB. O uso dessa técnica é comum para este propósito na área das ciências climáticas, definindo grupos que envolvem estações com características similares (LYRA et al, 2014; SANTOS et al, 2015; COSTA et al, 2020; SILVA et al, 2023). A estrutura de similaridade dos elementos de cada grupo é obtida pelo método da distância euclidiana (MIMMACK et al., 2001), expressa pela equação 1:

$$d_e = \left[\sum_{j=1}^n (P_{p,j} - P_{k,j})^2 \right]^{0,5} \quad (1)$$

onde d_e é a distância euclidiana, e $P_{p,j}$ e $P_{k,j}$ são as variáveis quantitativas j dos elementos p e k , respectivamente.

Para o agrupamento utilizou-se o método de Ward (1963), que identifica a menor variação entre os clusters (HERVADA-SALA e JARAUTA-BRAGULAT, 2004), unindo elementos cuja soma dos quadrados ou soma dos erros seja mínima, utilizando um método não supervisionado conhecido como K-means (ANDRÉ et al., 2008). O K-means visa agrupar os indivíduos de acordo com suas similaridades, aqui representadas pela distribuição mensal da

ETo dos pontos extraídos da análise gradeada de Xavier no NEB. A soma dos quadrados dentro de cada grupo é verificada a partir do quadrado da distância euclidiana de cada elemento a cada grupo, de acordo com a equação 2 (SILVA et al., 2023).

$$W = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{n_g} \|x_i - \bar{x}_g\|^2 = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{k=1}^K (x_{i,k} - \bar{x}_{g,k})^2 \quad (2)$$

onde W representa a função de ligação de Ward, dada pela soma dos quadrados dentro de cada grupo (G_i) (medida de homogeneidade); G é o número de elementos do grupo G_i na etapa k do processo de agrupamento; $X_{i,k}$ é o vetor de observações do k -ésimo elemento pertencente ao i -ésimo grupo; e $\bar{x}_g$ é o centróide do grupo G_i .

3.6 Metodologia de Intercomparação entre as fontes de dados de ETo

Os dados de Xavier foram obtidos do repositório criado pelos desenvolvedores dessa análise gradeada:

<https://sites.google.com/site/alexandrecandidoxavierufes/brazilian-daily-weather-gridded-data?authuser=0>.

Os dados do ERA5-Land foram obtidos do *Climate Data Store* fornecido pelo serviço temático do *Copernicus Climate Change Service* da União Europeia, acessível pelo link:

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=form>.

Os dados do MODGroETa foram obtidos do *Climate Data Store* fornecido pelo serviço temático do *Copernicus Climate Change Service* da União Europeia, acessível pelo link:

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-agroproductivity-indicators?tab=doc>.

Todas as informações foram obtidas em formato NetCDF (Network Common Data Form), um formato de arquivo para armazenar dados científicos multidimensionais. Para extração das séries temporais, análises estatísticas e geração de mapas foram criados scripts em linguagem R na versão 4.0.3.

Como cada ponto de observação à superfície possui coordenadas geográficas específicas aleatoriamente distribuídas no espaço, e qualquer grade sempre fornecerá quatro pontos de grade em torno de um ponto de interesse. Utilizou-se então as bases da teoria da interpolação bilinear simples (LIU et al., 2015), que calcula um valor da variável para um ponto específico da grade atribuindo pesos característicos a cada um dos quatro pontos de grade em relação ao ponto de interesse, com peso maior quanto mais próximo o ponto de grade estiver do ponto de

interesse (DA ROCHA JÚNIOR et al., 2019; SILVA et al, 2022). A Tabela 1 mostra os metadados principais de cada fonte de dados utilizada nesse trabalho.

Tabela 1 - Fonte de dados, respectiva resolução da grade, período total de dados disponíveis, metodologia e principal referência.

Fonte	Resolução	Período Utilizado	Metodologia	Referência
XAVIER	0.1°	1961-2020	Interpolação de estações	Xavier et al. (2022)
ERA5_Land	0.1°	1950-2023	Reanálise climática	Munoz Sabater et al. (2021)
MODGroETa	0.1°	2000-2018	Sensoriamento remoto	Brust et al. (2021)

Por se tratar da ETo, que tem como uma de suas principais utilizações ser dado de entrada em modelos agrometeorológicos (OLIVEIRA et al., 2021; LIMA et al., 2021), a primeira verificação qualitativa é feita comparando-se médias decendiais/mensais/sazonais/anuais da variável observada com as obtidas de cada fonte, a fim de evidenciar a premissa básica de que determinada estimativa oriunda de uma análise gradeada/reanálise deve basicamente representar o ciclo climatológico normal de qualquer variável de superfície que se pretende estudar (HERDIES et al., 2023). Em seguida, será realizada uma verificação quantitativa utilizando-se como medida de destreza o coeficiente de correlação de Pearson (r , equação (3)); e três medidas de erros: o BIAS ($BIAS$, equação (4)), o erro médio absoluto (MAE , equação (5)) e o erro quadrático médio ($RMSE$, equação (6)). Essa verificação da observação $\times$ série extraída dos pontos de grade foi utilizada em muitos estudos que atestaram sua eficácia (DEMIRES et al., 2005; MICHOT et al., 2018; RODRIGUES et al., 2021).

$$r = \frac{Cov(x, s)}{\sigma(x, s)} \quad (3)$$

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - x_i) \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ABS(s_i - x_i) \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - x_i)^2} \quad (6)$$

Adicionalmente a essas métricas utilizadas para analisar espacialmente a destreza das fontes de dados, comparamos a performance delas em cada região associada aos grupos homogêneos no NEB, para isso serão utilizados diagramas de Taylor. O diagrama de Taylor é amplamente usado para avaliar modelos climáticos (DENG et al., 2021), permitindo visualizar em um único diagrama informações de quatro estatísticas: desvio padrão da variável estimada da região (σ_s , equação (7)), desvio padrão observado nessa região (σ_x , equação (8)) coeficiente de correlação espacial (r , equação (3)) e a raiz do erro quadrático médio ($RMSE$, equação (6)), satisfazendo a seguinte relação no diagrama de Taylor (equação (9)).

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2} \quad (7)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

$$RMSE^2 = \sigma_s^2 + \sigma_x^2 - 2\sigma_s\sigma_x r \quad (9)$$

onde N é o número total de elementos das séries, S_i é a variável extraída das séries temporais de cada fonte de dados em cada momento i , x_i é a série temporal observada em cada momento i de cada ponto da análise gradeada, $\bar{S}$ e $\bar{x}$ são a média e desvio padrão observados, $Cov(x, s)$ é a covariância entre os dados, $\sigma(x, s)$ é o respectivo desvio padrão, σ é o desvio padrão e μ é a média dos dados.

Cada fonte de dados tem um período disponível diferente. Dessa forma, os resultados e análises serão gerados levando-se em consideração as seguintes escalas temporais:

- (1) Considerar-se-á o período total de dados da análise gradeada de Xavier para a análise de cluster: 1961-2020;
- (2) Para a análise de tendências e análise da estrutura das séries temporais, considerar-se-á o período total de dados da análise gradeada de Xavier: 1961-2020;
- (3) Para avaliação das duas fontes de dados de ETo, considerar-se-á o período em comum entre todas as fontes, que está condicionado ao período de dados do MODGroETa: 2000-2018.

3.7 Análise de tendências de séries temporais

Para analisar tendências em séries temporais, deve-se assumir uma hipótese nula (H_0) de que não existe tendência nos dados. O resultado obtido, no entanto, permitirá que se acolha ou rejeite essa hipótese, no caso de ficar provado que há tendência (HELSEL e HIRSCH, 2002). Importante ressaltar que tendências são baseadas unicamente no histórico das séries, não se podendo afirmar que as mesmas continuarão indefinidamente no futuro.

Um dos objetivos específicos dessa pesquisa é estudar a estrutura das séries temporais de ETo nas regiões homogêneas encontradas na análise de cluster e suas tendências no período 1961-2020. Para a análise de tendências usaremos o teste não paramétrico de Mann-Kendall, e para avaliar a estrutura das séries temporais, o teste de homogeneidade de Pettit, ambos brevemente descritos a seguir.

3.7.1 Teste não-paramétrico de Mann-Kendall (MK)

O teste de MK é análogo a uma análise de regressão linear, sendo mais indicado como um teste para verificar se os valores da série temporal tendem a aumentar ou a diminuir com o tempo (mudança monotônica), por apresentar maior robustez quando comparado a outros testes paramétricos, por não precisar que sejam alguns pressupostos quanto a normalidade dos dados e sua não-estacionariedade (BLAIN, 2011). Nesse teste, não deve existir correlação serial entre dados para que o *p-value* seja correto. YAN et al., 2015 mostra que, para um conjunto de dados $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, desde que $n > 4$, o teste de Mann-Kendall S utiliza as seguintes fórmulas:

A estatística padronizada Z é calculada usando o desvio padrão (S) e a variância $Var(S)$ de acordo com a equação 10:

$$Z(s) = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (10)$$

A estatística está próxima da normal quando n aumenta. Sendo a variância calculada pela equação 11:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (11)$$

O teste estatístico Z é usado como medida de significância de tendência, quando $Z > 0$, a tendência está aumentando, para $Z < 0$, a tendência está diminuindo. Ao testar as tendências ao nível de significância escolhido ($\alpha = 0,05$), H_0 é rejeitada sempre que $Z(t) > Z\alpha/2$ onde α é o nível de significância e $Z/2$ é a variável normalmente reduzida da função de distribuição normal padrão, então a hipótese nula é inválida, implicando que a tendência é significativa. No teste de Mann-Kendell aplicado, para valores de $p < 0,05$ indicam tendência estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95%.

O teste de Pettitt (PETTITT, 1979), será utilizado para detectar possíveis pontos de mudança nas séries de ETo nas regiões homogêneas do NEB. Este teste é comumente aplicado para identificar “quebras de patamar” em séries temporais de natureza climática (POHLERT, 2020), e utiliza uma versão do teste de Mann-Whitney (U_t, T), que verifica se duas amostras $X_1, \dots, X_T$ e $X_{t+1}, \dots, X_T$ pertencem à mesma população ou não. O teste não paramétrico é definido pelas equações 12 e 13:

$$K_t = \text{Max } |U_t, T| \quad (12)$$

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

para $t = 2, \dots, T$

A estatística (U_t, T) é então calculada para os valores de $1 < t < T$. Na hipótese nula e para cada t , a distribuição de (U_t, T) é simétrica em torno de zero com $K_t = 0$. Espera-se que haja grandes valores para K_t , quando houver um ponto de mudança nos dados. O ponto de mudança da série está localizado no K_t , desde que a estatística seja significativa. A probabilidade de significância de KT pode ser calculada pela equação 14:

$$p = 2 \exp\{-6k_T^2 / (T^3 + T^2)\} \quad (14)$$

Onde:

p = nível de significância; K_t = é o valor crítico; T = é o número de dados na série.

Estudos desenvolvidos no Brasil avaliaram tendências e pontos de mudanças em séries de variáveis meteorológicas aplicando os testes de Mann-Kendall e Pettitt (DOS SANTOS, *et al.*, 2012; SALVIANO *et al.*, 2016; ALMEIDA *et al.*, 2017, DOS SANTOS e OLIVEIRA, 2017; DA SILVA *et al.*, 2018b). Primeiramente se faz necessário verificar a existência de normalidade na série de dados, sendo geralmente aplicado o teste de Shapiro-Wilk para essa verificação (SHAPIRO e WILK, 1965). Estes pré-requisitos metodológicos foram aplicados na realização desse trabalho.

4 RESULTADOS

4.1 Climatologia da ET no Período 1961-2020

A partir das séries temporais da ET de cada município do NEB, obteve-se os valores médios mensais para o período 1961-2020, apresentados na Figura 3. Nota-se claramente a evolução anual da ET. De janeiro a abril, os maiores valores de ET são observados na porção semiárida dos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Bahia, estendendo-se mais a oeste e leste dessas áreas, que vai perdendo força até abril com valores que superam os 4 mm/dia, enquanto no oeste piauiense e no Maranhão, a ET se situa em torno de 3,5 mm/dia para menos. De maio a julho, os menores valores de ET são observados no leste do NEB, principalmente entre Pernambuco e Bahia, coincidindo com o período mais chuvoso dessa área do leste do NEB, com um núcleo que vai progressivamente se fortalecendo no interior do Piauí e adjacências, que encontra seu máximo de setembro a dezembro, período seco e de maiores temperaturas do norte do NEB, o que naturalmente causa uma maior demanda atmosférica por água do sistema solo-planta para o ar. Os máximos valores de ET, superiores a 5,5 mm/dia são observados no interior dos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco.

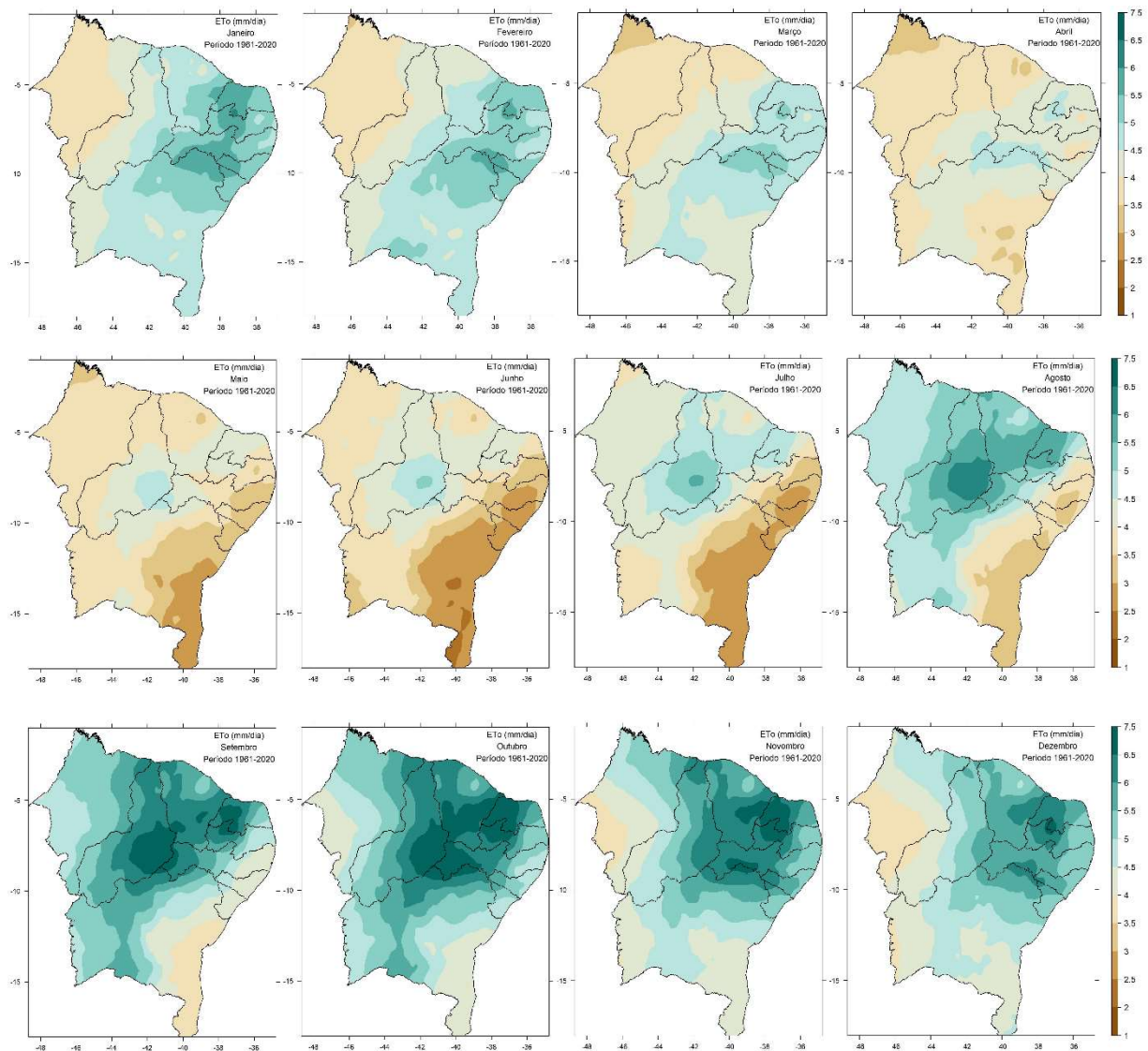


Figura 3 - Climatologia mensal da ET (mm/dia/mês) no Nordeste do Brasil. Período: 1961-2020.

Ao analisar a climatologia da Figura 3, surge a curiosidade de saber como tem-se dado a evolução da ET no período 1961-2020, um longo período de 60 anos onde vários estudos têm mostrado tendências de aumento das temperaturas e de secas no NEB (COSTA et al., 2020; MARENGO et al., 2021). A Figura 4 mostra uma diferença entre as médias mensais anuais da ET entre os períodos climatológicos normais 1991-2020 e 1961-1990. Nota-se predominância de desvios positivos da ET, que é um indicativo de tendências de maiores valores de ET nos últimos 30 anos. As áreas que mais se destacam quanto aos desvios positivos são o norte da Bahia em janeiro e fevereiro, com anomalias próximas de 1 mm/mês, que se estende para o interior dos estados de Pernambuco e Paraíba em março e abril. Esta situação permanece pouco

alterada entre maio e setembro, porém com deslocamento para oeste da Bahia e centro-sul do Piauí, com grande expansão da área com desvio positivo entre setembro e dezembro. Áreas com desvios negativos são observadas no norte do NEB em janeiro, e no leste do NEB de maio a agosto, que se tornam pequenos núcleos isolados de setembro a dezembro. Esses resultados são um forte indício, por exemplo, de um possível aumento real nas temperaturas do NEB, tendo-se em vista que a temperatura é a principal variável de influência para a ET.

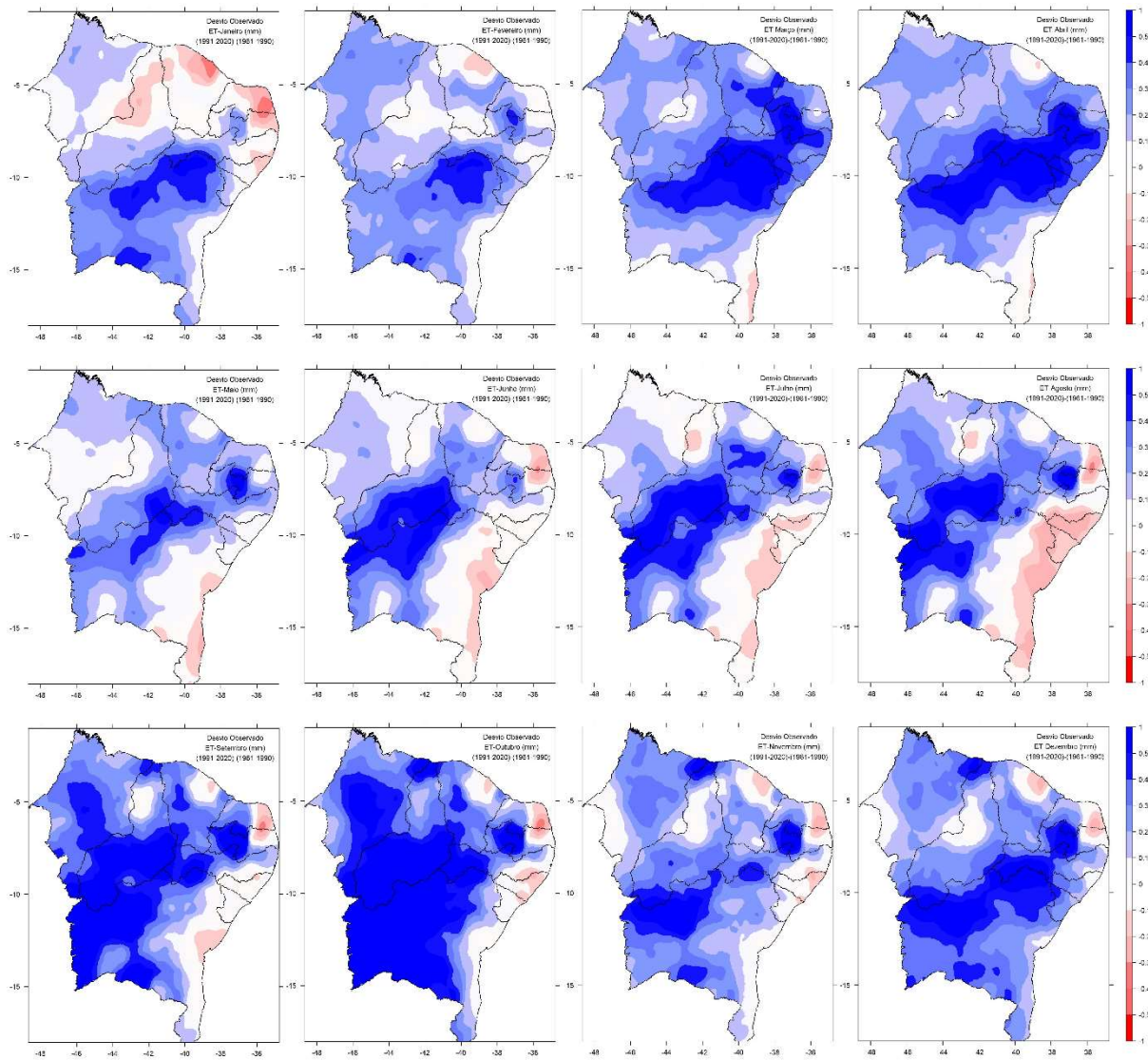


Figura 4 - Diferença média mensal da ET (mm/dia/mês) no Nordeste do Brasil, para o período 1991-2020 em relação ao período 1961-1990.

4.2 Análise de Grupamento

A análise de cluster realizada com as 2069 séries mensais de ET extraídas da análise gradeada de Xavier para o NEB proporcionou a divisão do NEB em seis regiões, ou grupos,

homogêneos de ET. Foram testados cluster a partir de 2 grupos, sendo o número de seis o ideal encontrado, quando não foi mais observado elementos de um grupo presentes de forma aleatória em outros grupos. A distribuição dos grupos mostra-se muito interessante, haja visto discordar, por exemplo, dos trabalhos que encontraram grupos homogêneos de precipitação para o NEB (LYRA et al., 2014; COSTA et al., 2020; BRASIL NETO et al., 2021; SILVA et al., 2023), o que reforça a independência dessa variável em relação a precipitação, embora possuam a mesma unidade de medida em mm.

A Figura 5a mostra que com seis grupos, a soma dos quadrados, levando-se em consideração o parâmetro da distância euclidiana, permaneceu aproximadamente constante, com os pontos agrupados e demonstrados em um dendrograma (Figura 5b). com o respectivo recorte (linha azul pontilhada) usado para dividir os grupos de acordo com o método da distância euclidiana e o agrupamento hierárquico usando a técnica de ligação de Ward (LYRA et al., 2014; SILVA et al., 2023). A Tabela 2 mostra o número de elementos pertencentes a cada região homogênea.

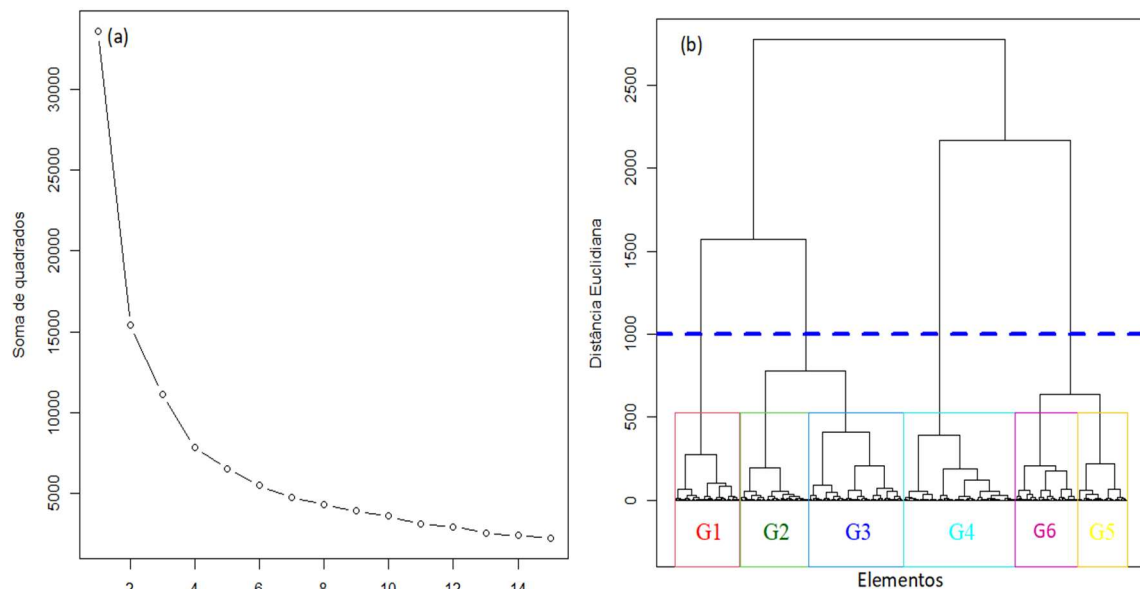


Figura 5 - Número do cluster (a) e dendrograma (b) referentes aos seis grupos com base na ETo mensal, considerando a distância euclidiana e o método de conexão Ward, para a NEB de 1961 a 2020.

Tabela 2 - Frequência absoluta e relativa do número de estações pertencentes as sub-regiões homogêneas determinadas segundo a precipitação mensal para a BLA.

Grupos	Número de elementos	Frequência Relativa (%)
1	299	14,5
2	437	21,1
3	286	13,8
4	312	15,1
5	509	24,6
6	226	10,9

Na Figura 6, o Grupo 1 (G1) contém 299 elementos (14,5% do total), situando-se na quarta colocação entre os grupos em número de pontos, destacados na cor vermelha, abrangendo quase todo o estado do Maranhão, com exceção de sua porção nordeste, e parte do sudoeste piauiense. O Grupo 2 (G2) é o segundo em número de elementos, com 437 postos, ou 21,1% do total, estendendo-se entre o nordeste maranhense, centro-norte piauiense, oeste pernambucano e quase todo Ceará, com exceção de duas porções, uma a nordeste e outra no extremo sudeste desse estado. O Grupo 3 agrupa os elementos do sudoeste do NEB, entre o sul piauiense e oeste baiano, com 286 elementos (13,8% do total). O grupo 4 (G4) possui 312 elementos (15,1% do total), envolvendo pontos do nordeste cearense, oeste do Rio Grande do Norte e Paraíba, centro pernambucano e parte do norte baiano. O grupo 5 (G5) incorpora o maior número de elementos, 509 ou 24,6% do total, muito em parte devido ao grande número de municípios que existem nessa área do leste do NEB, desde o centro-leste dos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, totalidade dos pontos em Alagoas e Sergipe, e alguns pontos no extremo nordeste da Bahia. O Grupo 6 (G6) agrupa 226 elementos no leste baiano, ou 10,9% do total, sendo o grupo com o menor número de elementos entre os verificados.

No verão, os menores valores observados da ET são observados, em média, no G1, com valor de 3,9 mm/dia, superando os 4,5 mm/dia nos demais grupos atingindo o máximo valor médio observado de 5,6 mm/dia no G4. No outono, G1 e G6 apresentam os menores valores, em média, de 3,7 mm/dia, com o G4 mostrando os maiores valores, em média de 4,4 mm/dia. No inverno o G6 apresenta em média as menores ET, com 2,9 mm/dia ante 4,8 mm/dia observada no G2. Na primavera observam-se os maiores valores de ET, em média, para todos os grupos, variando de 4,3 mm/dia no G6 a 6,0 mm/dia no G2. Em termos médios anuais, temos

o G4 com os maiores valores, de 5,2 mm/dia, seguido na sequência pelo G2 com 4,9 mm/dia, G3 e G5 com 4,5 mm/dia, G1 com 4,2 mm/dia e G6 com 3,9 mm/dia (Figura 5).

A Figura 7 mostra, de modo mais detalhado, a distribuição climatológica mensal da ET ao longo dos meses do ano de cada grupo homogêneo, onde pode-se comprovar que o período de setembro a novembro é o de maiores valores de ET para todos os grupos, enquanto os menores valores são observados no outono/inverno, entre abril a junho.

Entre as regiões homogêneas, a Figura 8 sintetiza em ordem decrescente os grupos em relação ao valor médio por dia/ano da ET. O G4 é o que apresenta a maior taxa de ET diária, de 5,2 mm/dia/ano, seguido do G2 com 4,9 mm/dia/ano, G3 com 4,5 mm/dia/ano, G5 também com 4,5 mm/dia/ano, G1 com 4,2 mm/dia/ano e por fim, com a menor taxa, o G6 com 3,9 mm/dia/ano.

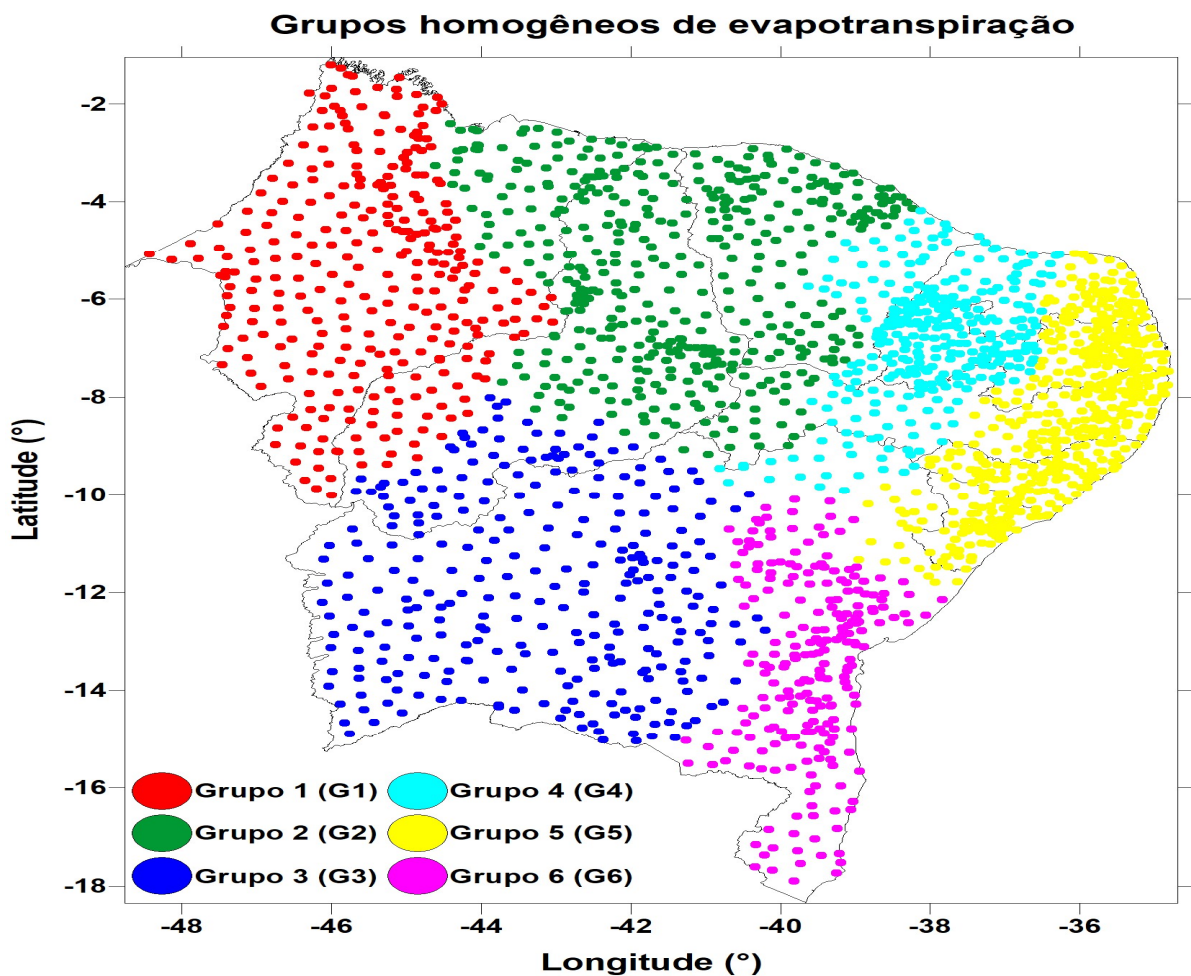


Figura 6 - Sub-região segundo a ET mensal distribuída no NEB, definidas com a localização dos grupos homogêneos.

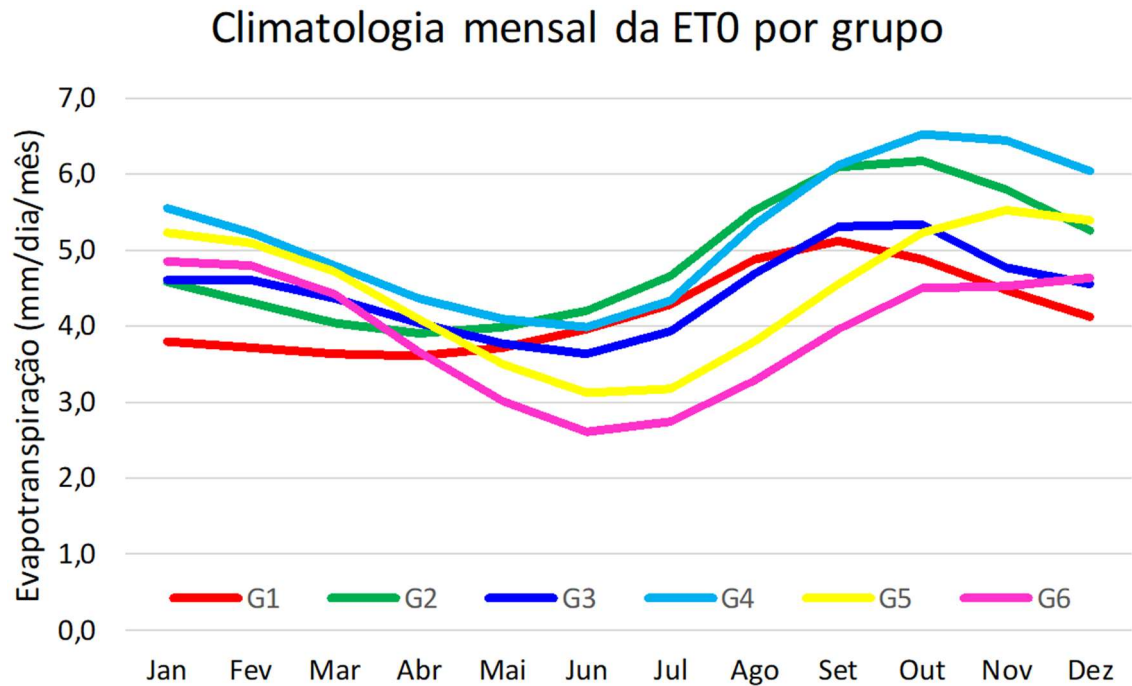


Figura 7 - ET diária média mensal obtida do conjunto de elementos para cada grupo homogêneo no NEB.

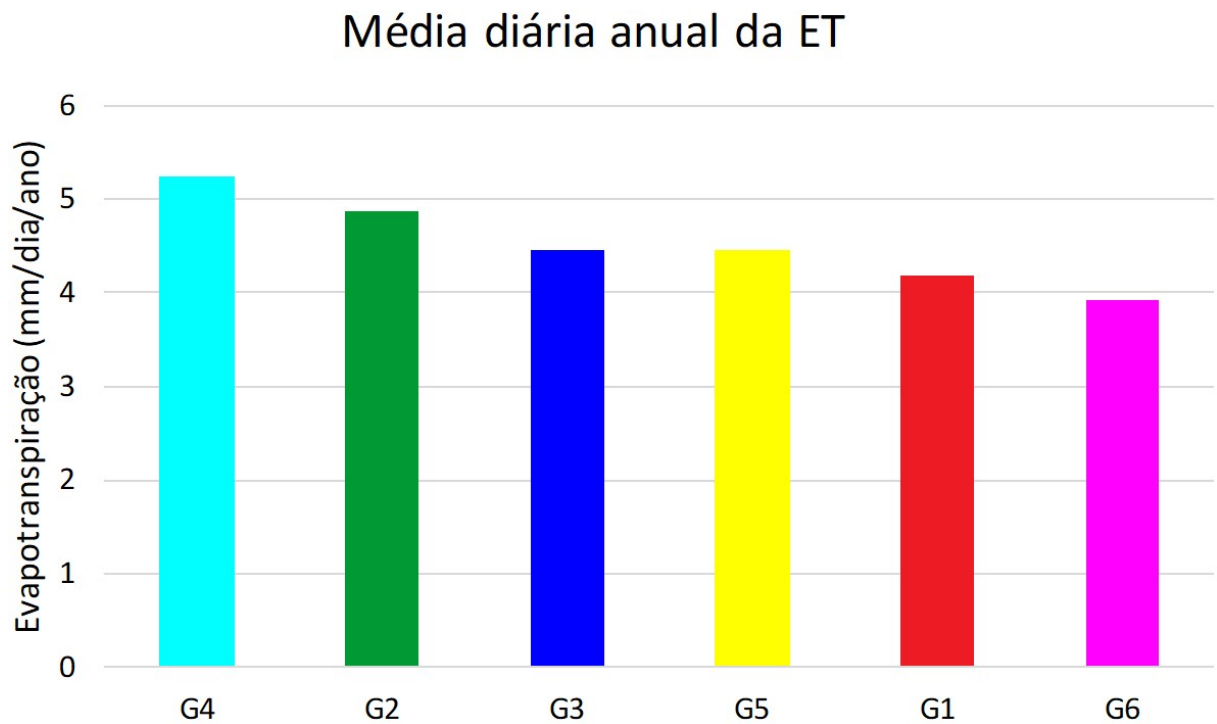


Figura 8 - ET diária média anual obtida do conjunto de elementos para cada grupo homogêneo no NEB.

4.3. Análise de Tendência e teste de Pettit da ET no NEB de 1961 a 2020

Utilizamos o teste não paramétrico de Mann-Kendall (MK) para avaliar tendências nas séries temporais de cada grupo homogêneo identificado na análise de cluster. Para isso, construímos uma série representativa de cada grupo com base na média de todos os seus elementos. As Tabelas 3, 4 e 5 apresentam as estatísticas descritivas dessas séries, para os períodos completos (1961-2020) e os períodos normais climatológicos (1961-1990 e 1991-2020). Importante ressaltar que, das tabelas, percebe-se o aumento dos valores de ET nos últimos 30 anos: 1991-2020, em todos os parâmetros descritivos, indicando tendência de incremento dessa variável em todas as regiões homogêneas observadas na análise de cluster.

Tabela 3 - Estatísticas descritivas da ET (mm/dia) nas seis regiões homogêneas do NEB para o período 1961-2020.

Período: 1961-2020						
Parâmetro	G1	G2	G3	G4	G5	G6
Mínimo	3,8	4,1	3,9	4,1	4,1	3,7
1° Quartil	4,1	4,7	4,2	4,8	4,5	4,0
Mediana	4,2	4,9	4,4	5,0	4,6	4,1
Média	4,2	4,9	4,4	5,0	4,6	4,1
3° Quartil	4,4	5,1	4,6	5,1	4,8	4,2
Máximo	4,5	5,5	4,9	5,6	5,2	4,5

Tabela 4 - Estatísticas descritivas da ET (mm/dia) nas seis regiões homogêneas do NEB para o período 1961-1990.

Período: 1961-1990						
Parâmetro	G1	G2	G3	G4	G5	G6
Mínimo	3,8	4,1	3,9	4,1	4,1	3,7
1° Quartil	3,9	4,5	4,1	4,7	4,4	3,9
Mediana	4,0	4,7	4,2	4,8	4,6	4,0
Média	4,0	4,7	4,2	4,8	4,6	4,0
3° Quartil	4,2	4,9	4,4	5,1	4,7	4,1
Máximo	4,5	5,5	4,6	5,4	5,0	4,4

Tabela 5 - Estatísticas descritivas da ET (mm/dia) nas seis regiões homogêneas do NEB para o período 1991-2020.

Período: 1991-2020						
Parâmetro	G1	G2	G3	G4	G5	G6
Mínimo	4,1	4,6	4,0	4,7	4,4	3,7
1° Quartil	4,2	4,8	4,4	4,9	4,6	4,1
Mediana	4,3	5,0	4,5	5,1	4,7	4,2
Média	4,3	5,0	4,5	5,1	4,7	4,2
3° Quartil	4,4	5,1	4,7	5,2	4,8	4,3
Máximo	4,5	5,3	4,9	5,6	5,2	4,5

A Figura 9 mostra as tendências usando o teste MK para os períodos completos de 1961-2020 (painel superior) e das normais climatológicas 1961-1990 e 1991-2020 (painel inferior, respectivamente). Para a região homogênea 1 (G1), há uma tendência crescente na intensidade da velocidade do vento a partir da década de 1970, como pode ser observado nos gráficos do painel superior, onde há uma tendência ascendente desde o início da série até o final de década de 2010, e depois uma leve tendência negativa, como melhor observada no gráfico do período 1991-2020. Para todo o período, a tendência é positiva e estatisticamente significativa, com um valor do parâmetro Tau de Kendall de 0,470 e respectivo p-valor de 0,000. No período 1961-1990 a tendência é igualmente positiva (Tau de Kendall = 0,315) e estatisticamente significativa a um nível de confiança de 95% (p-valor = 0,022), enquanto no período 1991-2020 a tendência também é positiva, de 0,128, porém não significativa com p-valor = 0,128.

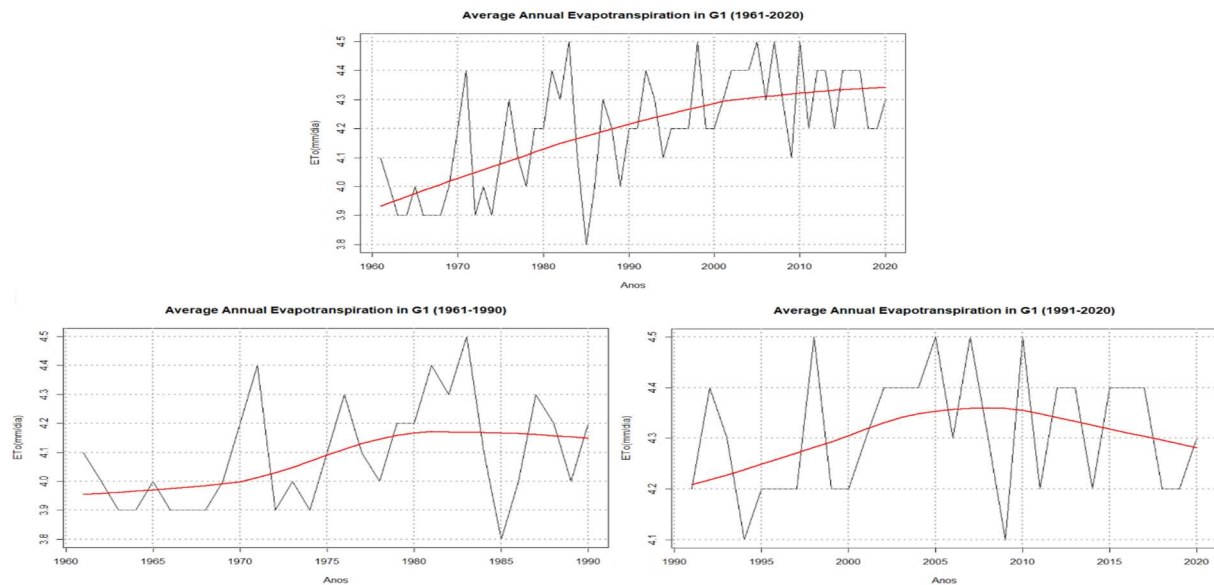


Figura 9 - Série temporal das médias diárias anuais da ET, para 1961-2020 e respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G1. No painel inferior, para os períodos climatológicos 1961-1990 (esquerda) e 1991-2020 (direita).

As Figuras 10 a 14 mostram as tendências para os grupos homogêneos G2 a G6. Os gráficos ressaltam a importância da análise completa e pormenorizada das séries de ET. Para todas as séries completas de 1961 a 2020, de G1 a G6, tendência positiva e extremamente significativa, a um nível de confiança de 99%, é observada. Porém, ao se analisar os períodos de 30 anos que compõem as séries completas, percebe-se diferentes nuances. Para G2, não há significância estatística nas tendências positivas dos períodos 1961-1990 e 1991-2020 (Figura 10). O mesmo ocorre com o G6 (Figura 14), onde inclusive percebe-se a única tendência negativa entre todas as séries estudadas, no período 1961-1990, porém sem significância estatística.

O período 1961-1990, inclusive, foi o que apresentou o maior número de tendências com significância estatística, para os grupos G1 (Figura 9), G4 (Figura 12) e G5 (Figura 13), versus apenas um caso com significância estatística de tendência positiva observada no período 1991-2020 no G3 (Figura 11). Esses resultados mostram que, apesar de evidente o aumento no patamar dos valores observados de ET no período 1991-2020 em relação ao período 1961-1990, na maior parte dos grupos a inclinação da curva é mais proeminente no período 1961-1990 e após, em 1991-2020, tende a reduzir a inclinação e estabilizar. Esse efeito conferiu, na análise completa das séries para 1961-2020, tendências positivas com extremo nível de significância estatística.

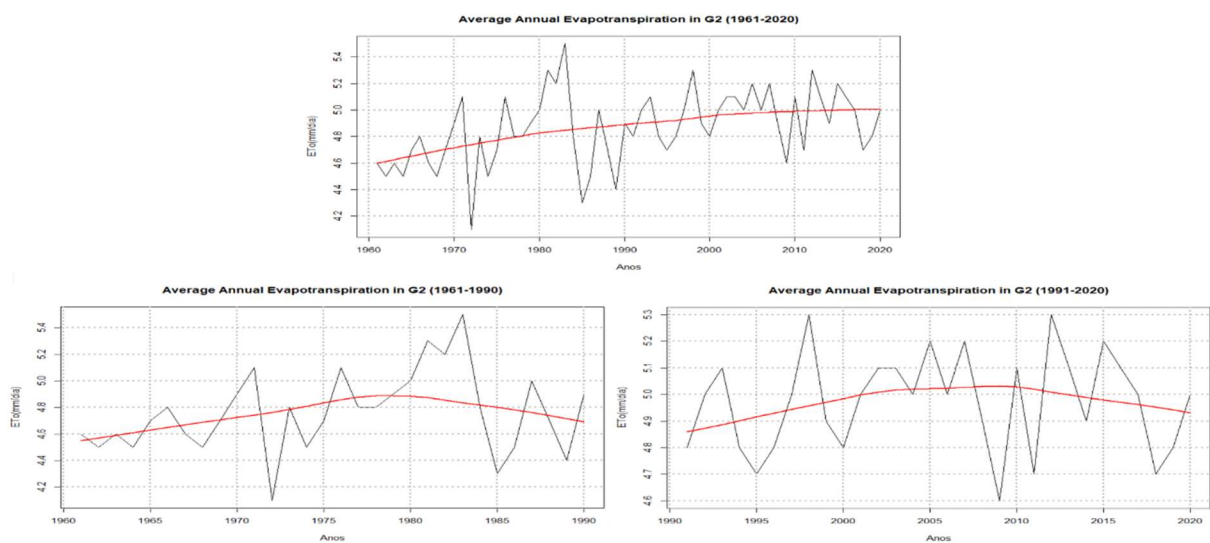


Figura 10 - Série temporal das médias diárias anuais da ET, para 1961-2020 e respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G2. No painel inferior, para os períodos climatológicos 1961-1990 (esquerda) e 1991-2020 (direita).

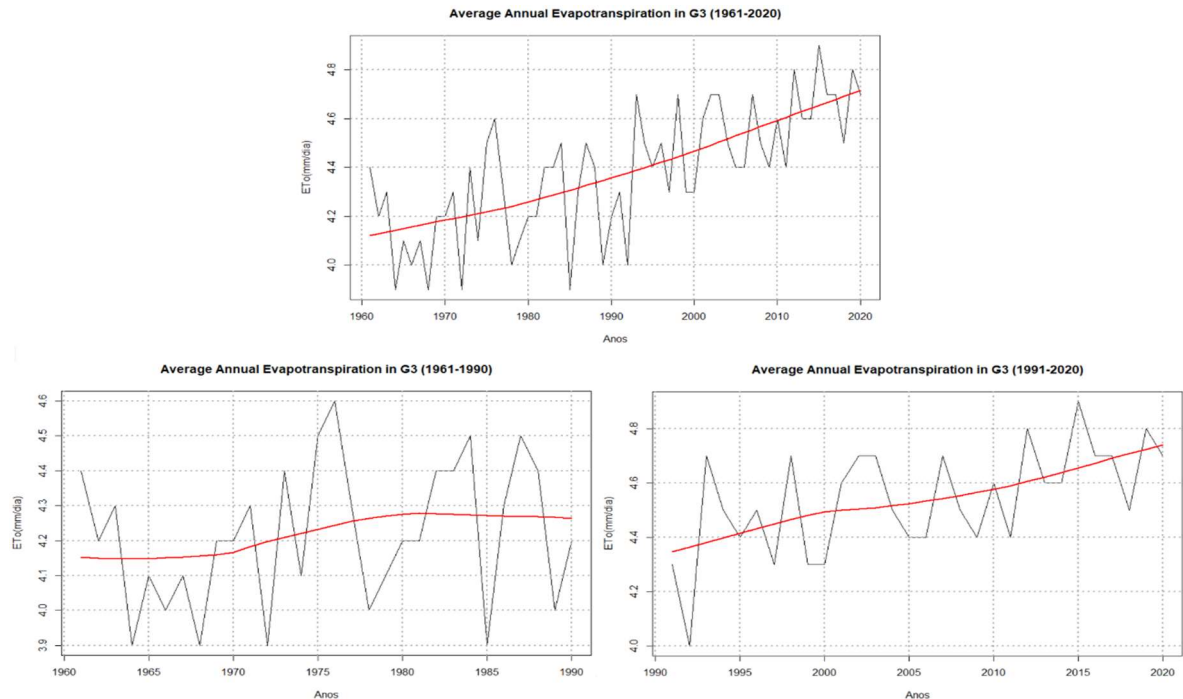


Figura 11 - Série temporal das médias diárias anuais da ET, para 1961-2020 e respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G5. No painel inferior, para os períodos climáticos 1961-1990 (esquerda) e 1991-2020 (direita).

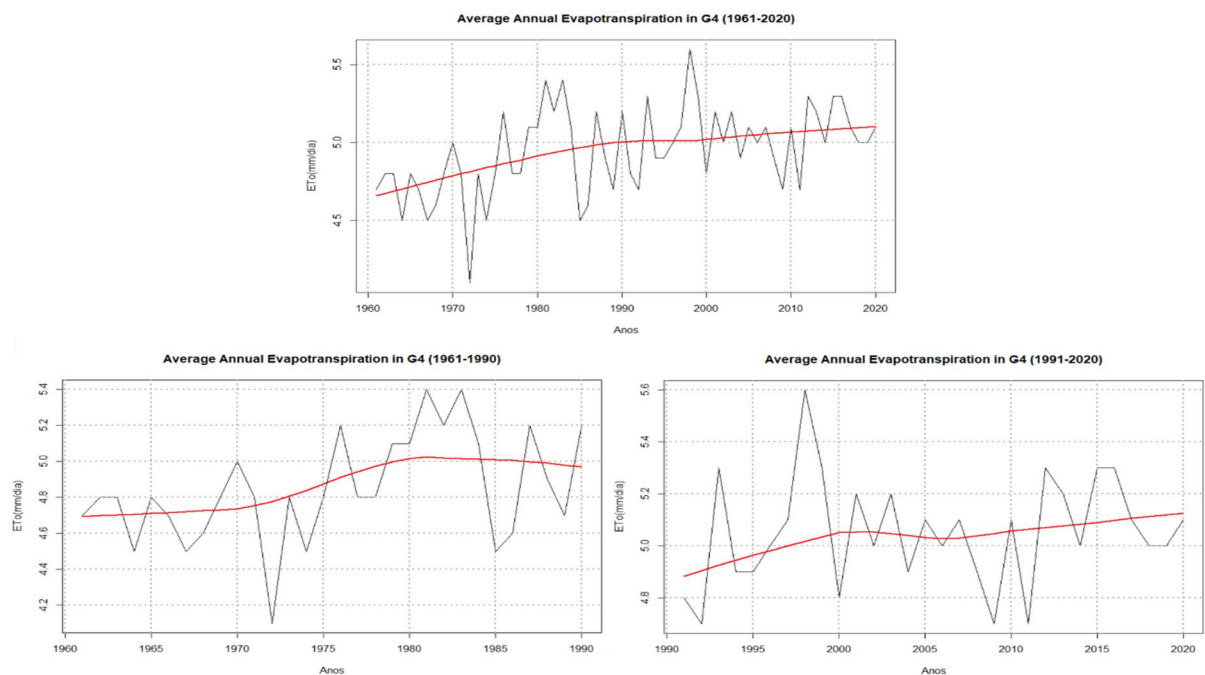


Figura 12 - Série temporal das médias diárias anuais da ET, para 1961-2020 e respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G4. No painel inferior, para os períodos climatológicos 1961-1990 (esquerda) e 1991-2020 (direita).

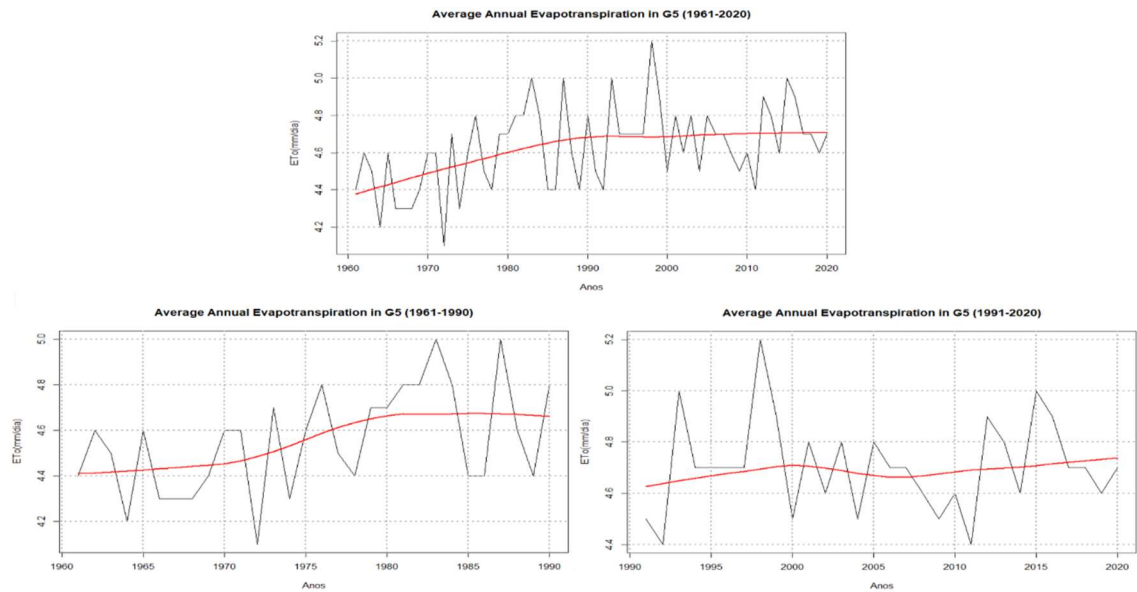


Figura 13 - Série temporal da médias anuais da ET, para 1961-2020 e respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G5. No painel inferior para os períodos climatológicos 1961-1990 (esquerda) e 1991-2020 (direita).

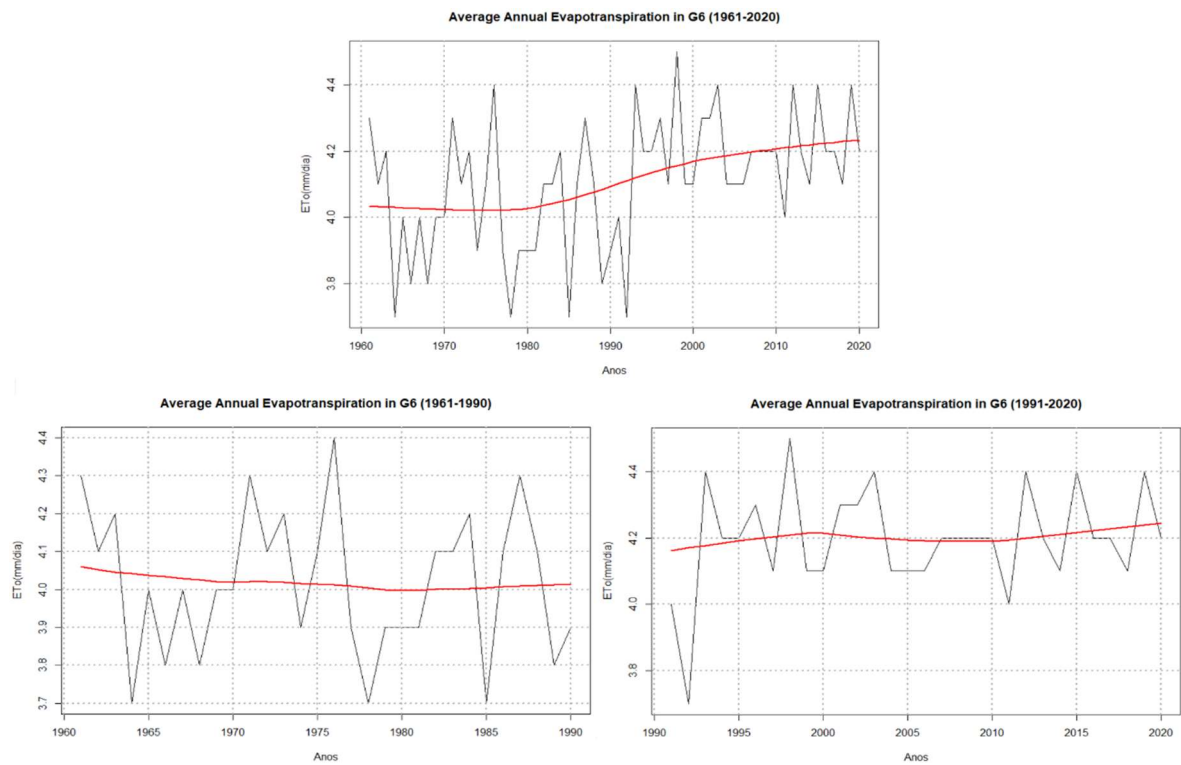


Figura 14 -- Série temporal das médias diárias anuais da ET, para 1961-2020 e respectiva linha de tendência utilizando o teste MK para G6. No painel inferior, para os períodos climatológicos 1961-1990 (esquerda) e 1991-2020 (direita).

As características principais dos resultados do teste de MK, para todas as séries avaliadas são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados estatísticos principais do teste de Mann-Kendall nos três períodos climáticos analisados, para as seis regiões homogêneas de velocidade do vento do NEB.

Regiões	G1		G2		G3		G4		G5		G6	
	Tau	p-valor	Tau	p-valor	Tau	p-valor	Tau	p-valor	Tau	p-valor	Tau	p-valor
1961-2020	0,470	0,000**	0,333	0,000**	0,537	0,000**	0,337	0,000**	0,304	0,001**	0,306	0,001**
1961-1990	0,315	0,022*	0,242	0,069	0,181	0,181	0,332	0,014*	0,372	0,006**	-0,042	0,758
1991-2020	0,128	0,373	0,076	0,574	0,397	0,004**	0,132	0,328	0,020	0,884	0,098	0,483

Nível de confiança: *95%; **99%.

4.4. Análise Estrutural das Séries Temporais Usando o Teste de Pettitt

O teste de Pettitt é um teste não paramétrico baseado numa versão do teste de MannWitney, teste U, para estimar o ponto de quebra de uma sequência de variáveis (PETTITT, 1979). Ele é uma alternativa não paramétrica ao teste t de Student, sendo útil quando a distribuição dos dados é desconhecida ou não segue exatamente uma distribuição normal, como é o caso de séries temporais de ET. O teste compara as medianas dos grupos em vez das médias, tornando-o robusto a outliers e distribuições assimétricas.

O teste de Pettitt identificou os pontos de mudanças nas séries de ET das regiões homogêneas, de acordo com o parâmetro K, relativo ao número da ordem de mudança associado ao respectivo ano na série temporal, e o p-valor dessa mudança relativa ao ano de inflexão observado ao final da série.

Para auxiliar na visualização dessas quebras estruturais, em uma avaliação anual, foram identificados pontos de mudança para todos os grupos homogêneos. Para o G1 (Figura 15), foi identificado o ponto 31, correspondente ao ano de 1991 como o de inflexão no comportamento da série temporal, indicando acréscimo sistemático da ET a partir desse ano. Para o G2 (Figura 16), o ponto 15, relativo ao ano de 1975 marca a mudança no padrão de ET, com acréscimo a partir de então nos valores observados. Para o G3 (Figura 17), o ponto 32 que corresponde ao

ano de 1992 marca o acréscimo sistemático da ET, que em todo período anterior, de 1961 a 1991, apresentou forte variabilidade anual, porém seguindo um padrão médio.

Para o G4 (Figura 190), o ano de 1978 relativo ao ponto 18 da série representa o início da mudança sistemática no padrão médio da ET, que passa a aumentar sistematicamente a partir desse ano, de forma contrária a leve tendência de decréscimo que foi verificada de 1961 até aproximadamente 1977, influenciada fortemente pelo mínimo valor de ET (mm/dia) do ano de 1972. Comportamento similar ao do G4 é observado para o G5 (Figura 19), com o máximo de inflexão na série também observado no ponto 18, relativo ao ano de 1978, quando a partir de então a elevação média anual dos valores da ET torna-se constante. Por fim, o G6 (Figura 20) apresenta comportamento similar ao G3, observando-se uma quebra estrutural no ponto 32, relativo ao ano de 1992, quando os valores de ET passam por um relativamente brusco aumento de seus valores médios diários por ano.

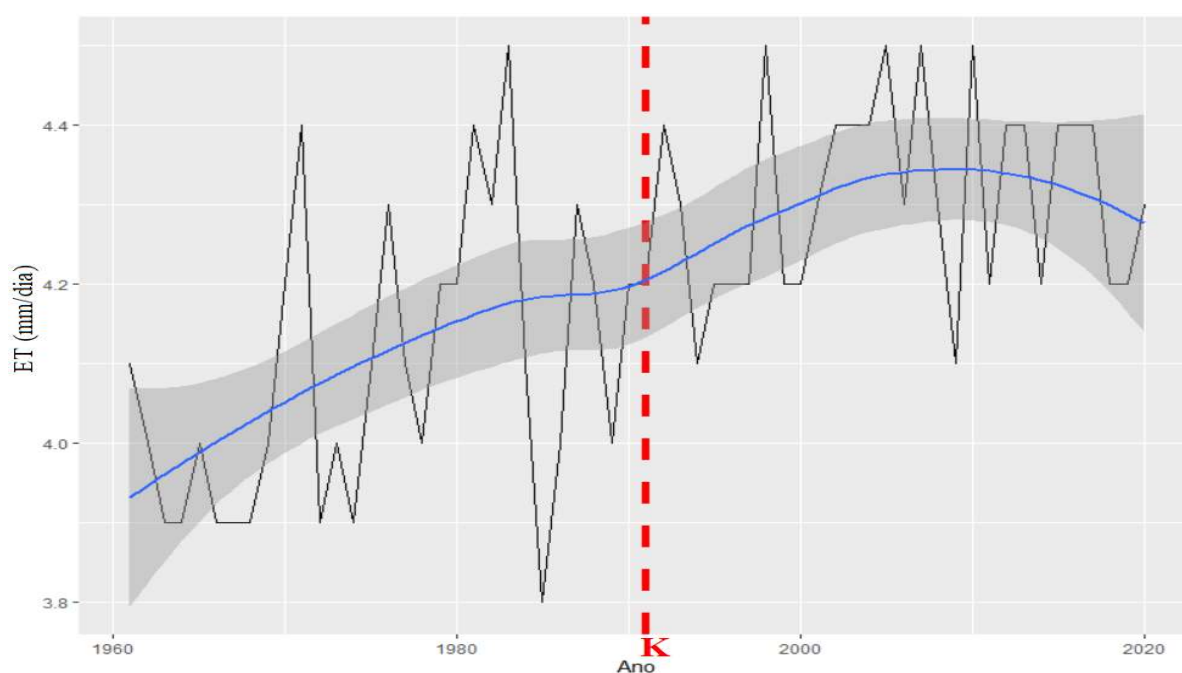


Figura 15 - Teste de Pettitt aplicado a série temporal da média diária anual de ET do G1, no período 1961-2020. A curva azul é relativa a um ajuste polinomial de ordem 6 aos dados, com respectiva mancha de $\pm 2,5$ desvios padrão. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste, nesse caso: 1991.

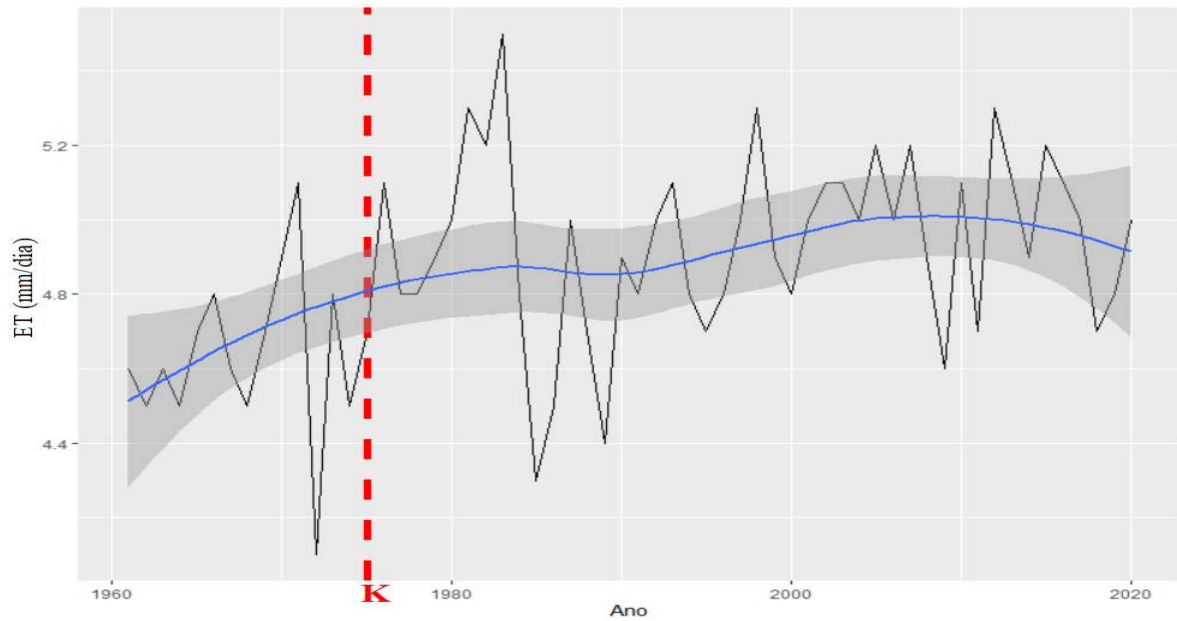


Figura 16 - Mesmo da Figura 15, mas para G2. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste, nesse caso: 1975.

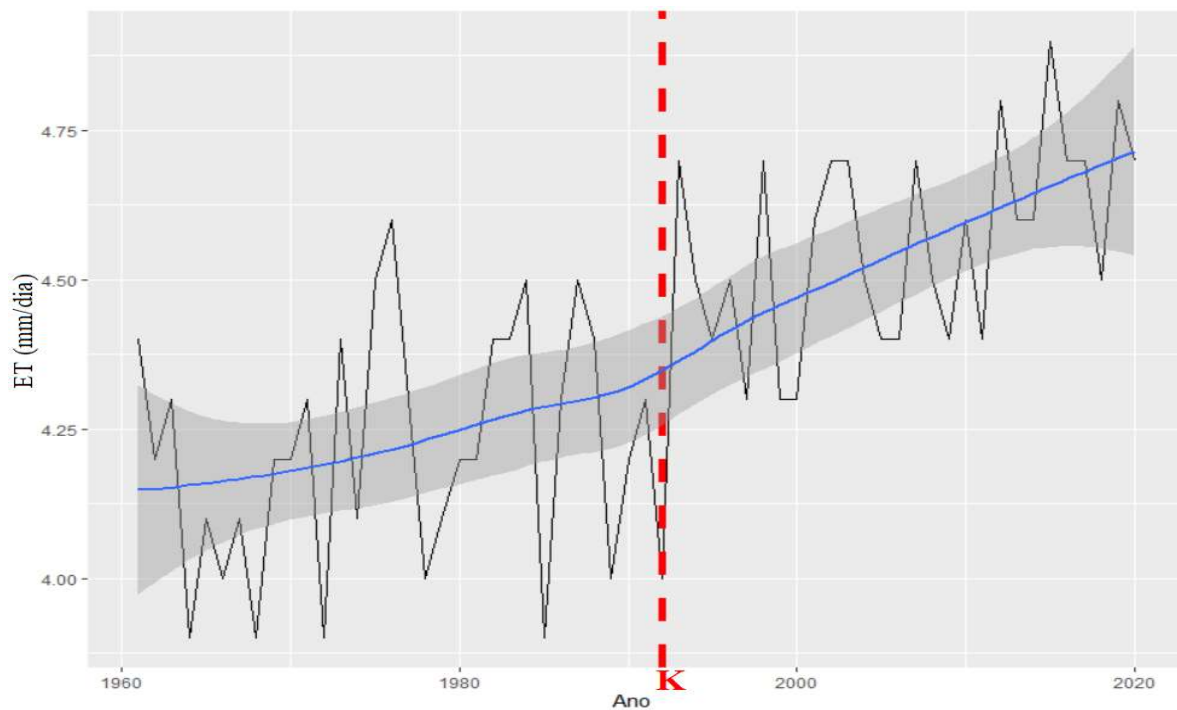


Figura 17 - Mesmo da Figura 15, mas para G3. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste, nesse caso: 1992.

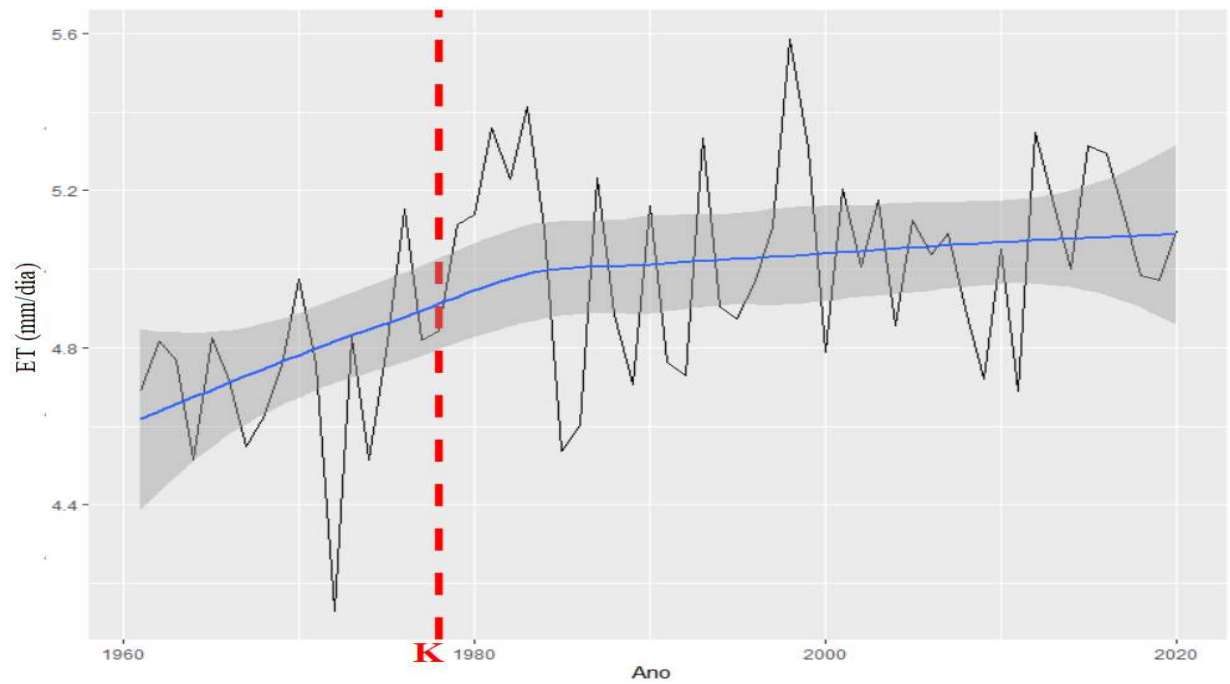


Figura 18 - Mesmo da Figura 15, mas para G4. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste, nesse caso: 1978.

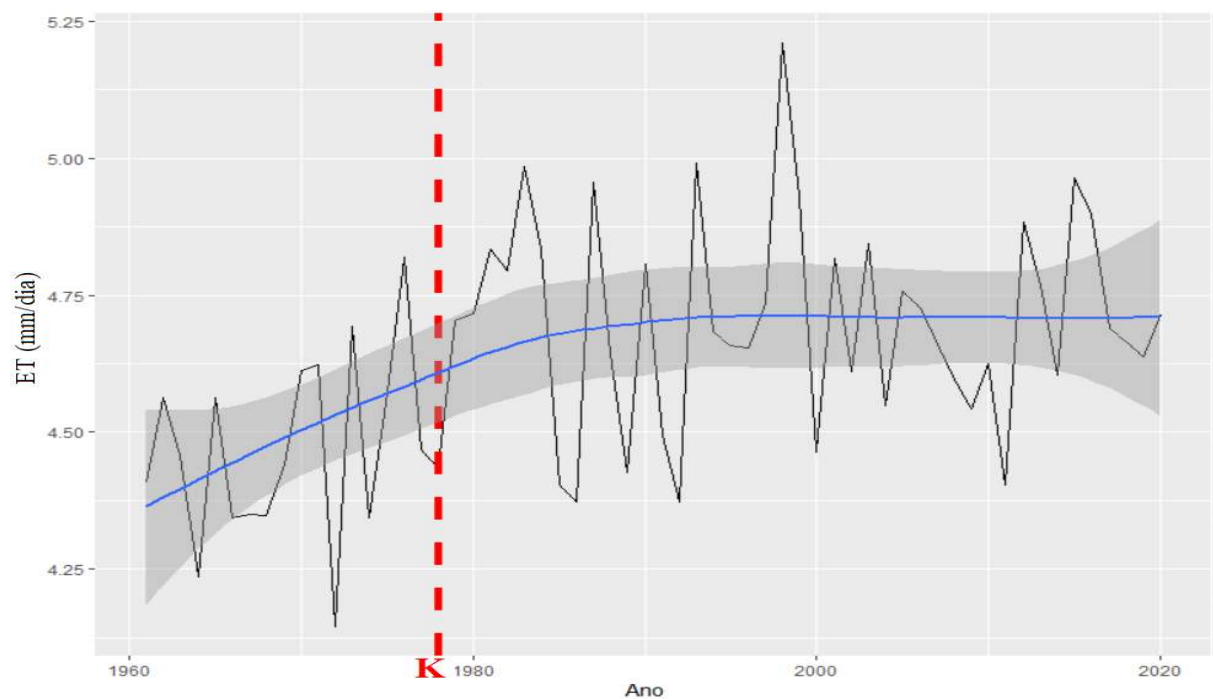


Figura 19 - Mesmo da Figura 15, mas para G5. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste, nesse caso: 1978.

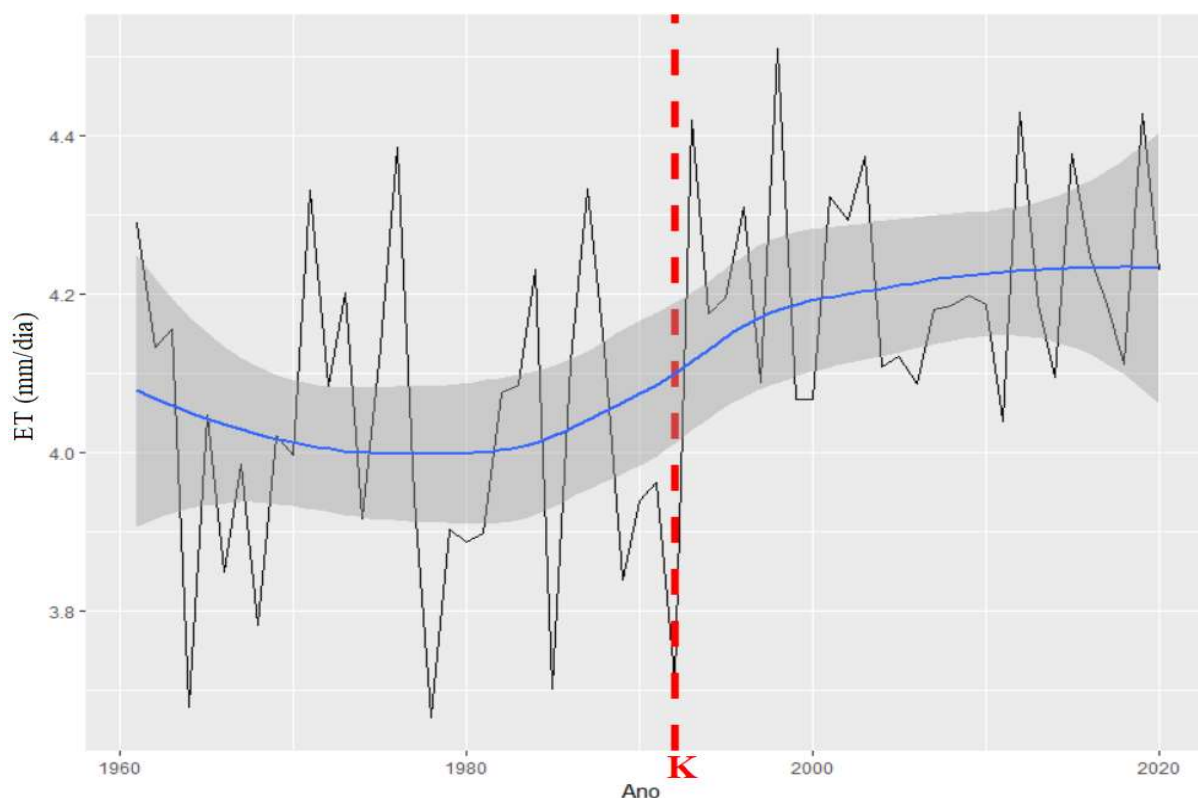


Figura 20 - Mesmo da Figura 15, mas para G6. A linha pontilhada vermelha representa o ano do ponto de mudança, K, identificado no teste, nesse caso: 1992.

4.5. Análise da ET estimada pelo MODGroEta e ERA5Land

Nesta seção avaliamos a performance, em nível decenal, das estimativas de ET do algoritmo MODGroETA e da reanálise ERA5Land. Escolheu-se essa escala temporal para análise pelo motivo da saída do MODGroETA ser decenal, justificada devido a maioria dos modelos agrometeorológicos usar essa escala temporal para estimativa da umidade do solo e da produtividade das culturas em suas simulações.

O MODGroETA usa dados de reanálise meteorológica diária ERA-Interim, juntamente com produtos de dados de sensoriamento remoto do Copernicus Global Land Service, como cobertura fracionada da vegetação, albedo e índice de área foliar. O algoritmo do modelo MODGroETA é executado em uma escala de tempo diária que é então agregada a decadal, somando-se a ET estimada durante o dia e noite a partir da soma dos fluxos de vapor de água

da evaporação do solo, evaporação do dossel úmido e transpiração da planta na superfície do dossel seco.

A ET do ERA5Land usa dados de superfície do refinamento continental aplicado aos dados da reanálise ERA5 (MUÑOZ et al., 2021). A base teórica da abordagem dessa reanálise é a equação de Penman-Monteith, onde a evaporação e a transpiração (através da vegetação) ocorreriam se não fossem limitadas pela disponibilidade de água, mas apenas pela demanda atmosférica (ou seja, radiação, temperatura) e pelas propriedades da superfície da Terra (principalmente cobertura fracionada de vegetação).

Para o período de análise de 2000 a 2018, foram calculadas inicialmente as médias climatológicas decendiais de cada mês, a fim de identificar similaridades e/ou diferenças entre as médias obtidas da observação, e dos conjuntos de dados MODGroETa e ERA5Land.

A Figura 21 mostra a espacialização das médias da ET, apenas para os três decêndios de janeiro e de julho. Nota-se dos mapas, organizados com a observação à esquerda, MODGroETa no centro e ERA5Land à direita, há superestimação dos valores de ET por parte dessas duas fontes de dados em janeiro. É visível, ainda, que a ET do ERA5Land ainda tende a superestimar mais os valores do que o MODGroETa, como se nota para os mapas de julho na Figura 22. Nos decêndios dos demais meses, não mostrados, percebe-se a mesma configuração de janeiro e julho, escolhidos por representarem meses com distintos comportamentos da ET, principalmente no centro-leste do NEB.

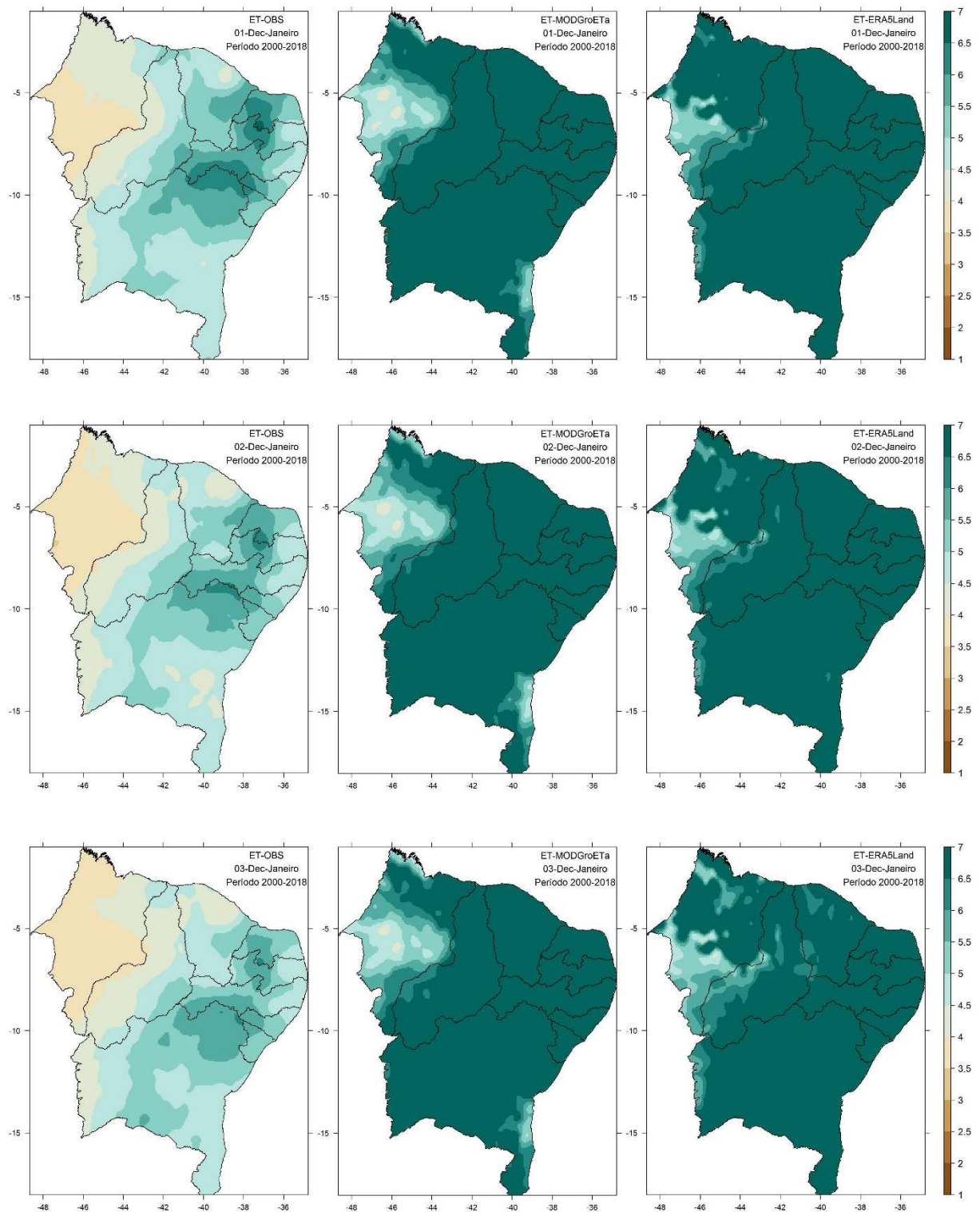


Figura 21 - Médias de ET no período 2000-2018 obtidas da observação (esquerda), MODGroETa (centro) e ERA5Land (direita), para o primeiro decêndio de janeiro (painel superior), segundo decêndio (painel intermediário) e terceiro decêndio (painel inferior).

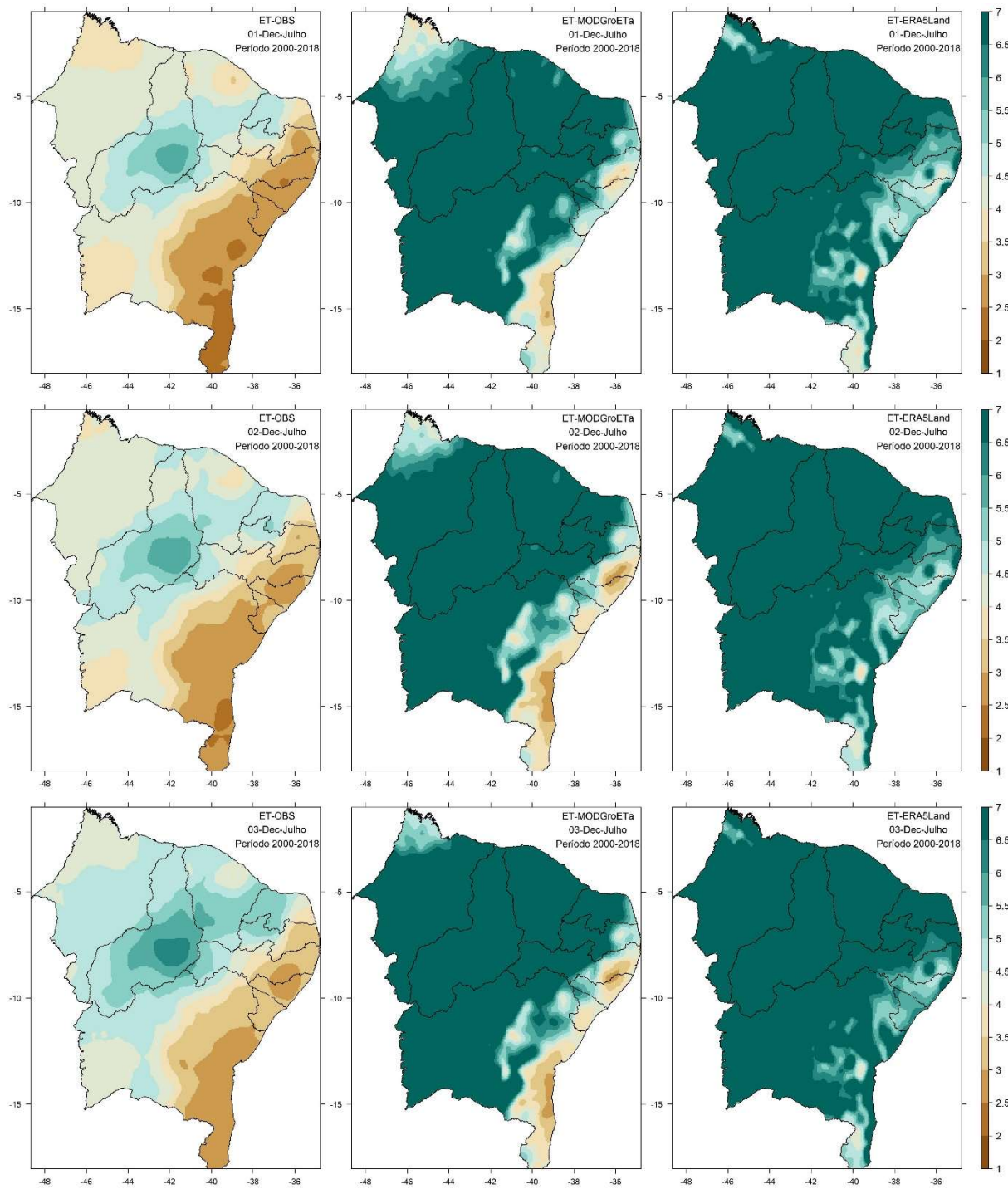


Figura 22 - Médias de ET no período 2000-2018 obtidas da observação (esquerda), MODGroETa (centro) e ERA5Land (direita), para o primeiro decêndio de julho (painel superior), segundo decêndio (painel intermediário) e terceiro decêndio (painel inferior).

Para sintetizar os resultados das diferenças de forma homogênea para todos os decêndios de todos os meses do ano, mostra-se na Figura 23 o mapa do viés médio das estimativas desses conjuntos de dados em relação as observações. O MODGroETa apresenta vieses positivos concentrados no norte do NEB (esquerda), com valores que igualam e até ultrapassam os 10 mm/decêndio, enquanto no centro-sul do NEB, ocupando a totalidade da Bahia, Sergipe, Alagoas e a maior parte de Pernambuco, o viés é negativo, de 2 a 4 mm/decêndio. Já as estimativas do ERA5Land (direita) superestimam a ET observada em todo o NEB, com predomínio de valores de 1 a 2 mm/decêndio nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe, e áreas com valores que superam os 6 mm/decêndio em porções do Maranhão, Piauí e Bahia, principalmente.

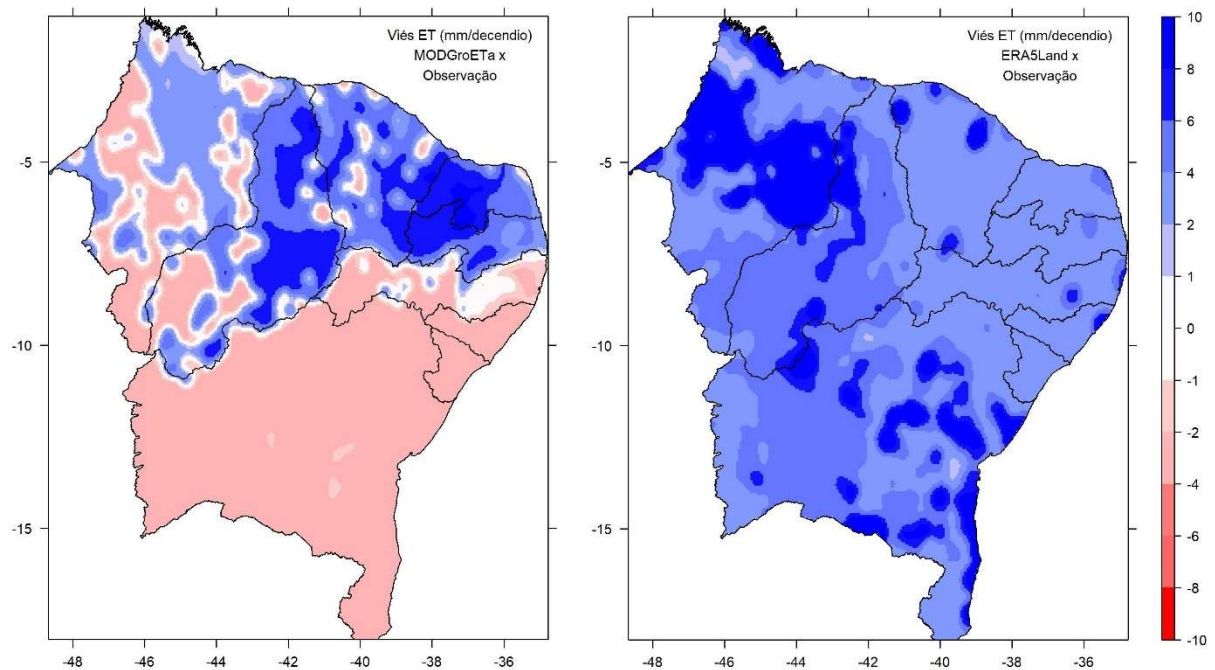


Figura 23 - Viés médio decendial do MODGroETa (esquerda) e ERA5Land (direita).

Após a constatação dos vieses, um procedimento para correção deles foi implementado. Primeiro, calcularam-se as diferenças entre os valores de cada fonte de dados e observação de cada decêndio no período de análise. Em seguida, um valor médio de viés para cada decêndio foi obtido da média de todas as diferenças, permitindo o ajuste de cada estimativa original de ET do MODGroETa e ERA5Land subtraído desse viés médio decendial. Esse procedimento

faz-se necessário para uso efetivo da ET dessas fontes de dados, uma vez que com os vieses observados, tais valores muitas vezes se encontram distantes da realidade.

Após tal procedimento de correção de vieses, mostra-se o ganho dos valores corrigidos em relação aos originais a partir da comparação das métricas estatísticas correlação (r), e de medias de erros MAE e RMSE.

Na Figura 24, antes da correção de viés as correlações entre a ET estimada pelo MODGroETa e observada apresenta valores baixos, com núcleos inferiores a 0,4 no norte e sul do NEB, com uma grande área homogênea entre o norte da Bahia, Sergipe, Alagoas e Pernambuco com correlações variando de 0,5 a 0,65, e núcleos dispersos de maiores correlações observadas entre os estados do Maranhão, Piauí e Ceara, porém, mesclados com áreas de menores correlações. Após a correção do viés (mapa à direita), percebe-se o aumento nos valores das correlações em todo NEB, principalmente no norte da região. Antes da correção, a correlação média no NEB foi de 0,52, e após a correção, foi de 0,68.

A Figura 25 apresenta o antes e depois das correlações para o ERA5Land. Mesmo antes da correção de viés as correlações desse conjunto de dados com as observações já eram maiores que as do MODGroETa (mapa a esquerda), com valor médio na área de 0,82, enquanto após a correção de viés esse valor foi de 0,91, mostrando que apesar dos altos vieses, as orientações dos valores simulados pelo ERA5Land foram mais coincidentes com a orientação temporal dos valores observados de ET.

Quanto aos erros, as Figuras 26 e 27 mostram respectivamente a espacialização do MAE para o MODGroETa e ERA5Land, com os mapas a esquerda antes da correção por viés e a direita após a correção. Nota-se, nos dois casos, redução significativa dos erros observados, principalmente para o ERA5Land. Antes da correção, o MAE do MODGroETa era em média, de 8,6 mm/decêndio, passando então a um valor médio de 4,4 mm/decêndio. O mesmo se dá para o RMSE mostrado nas Figuras 28 e 29, um parâmetro tem a vantagem de penalizar mais severamente os maiores erros. Antes da correção do viés, o RMSE do MODGroETa era em média, 9,1 mm/decêndio, e após foi reduzido para 4,9 mm/decêndio, enquanto para o ERA5Land, o RMSE diminuiu de 6,2 mm/decêndio para 4,0 mm/decêndio.

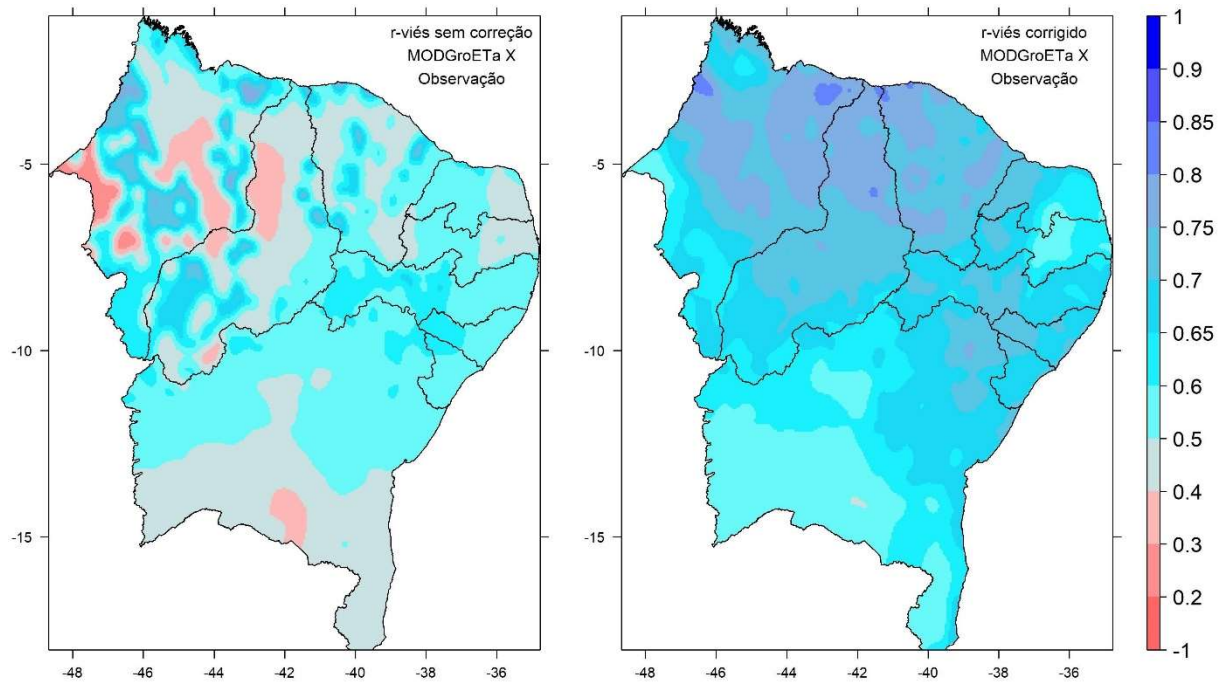


Figura 24 - Correlação decenal do MODGroETa antes da correção de viés (esquerda) e após correção de viés (direita).

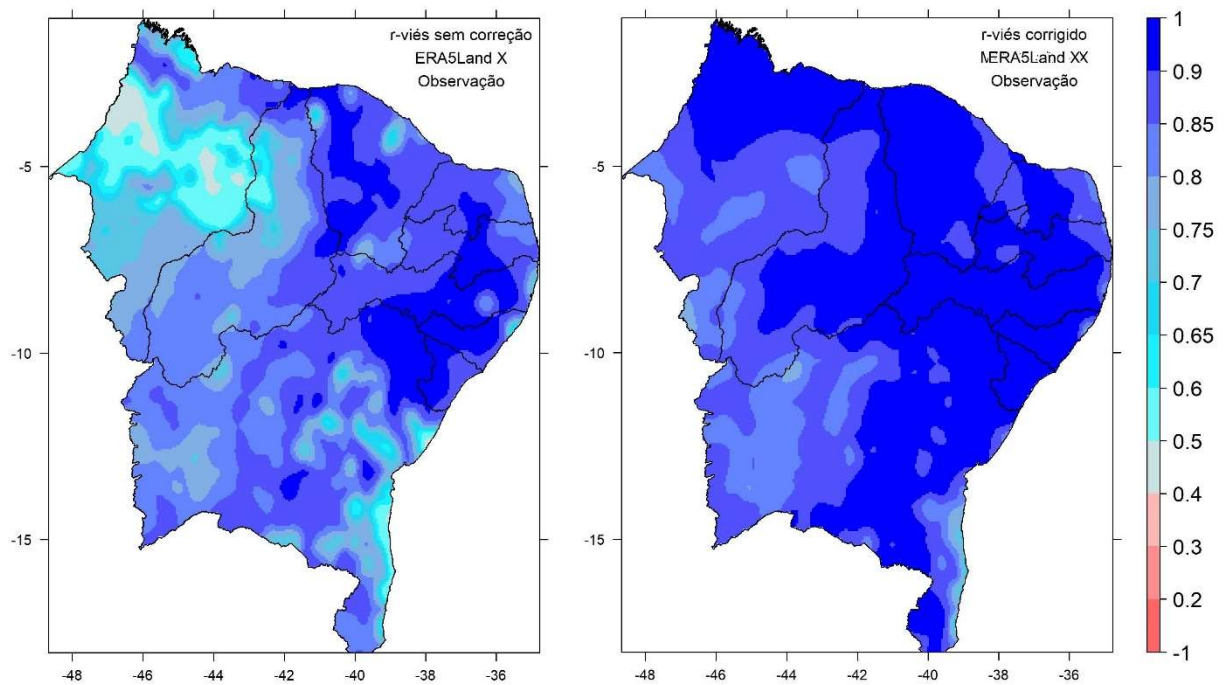


Figura 25 - Correlação decenal do ERA5Land antes da correção de viés (esquerda) e após correção de viés (direita).

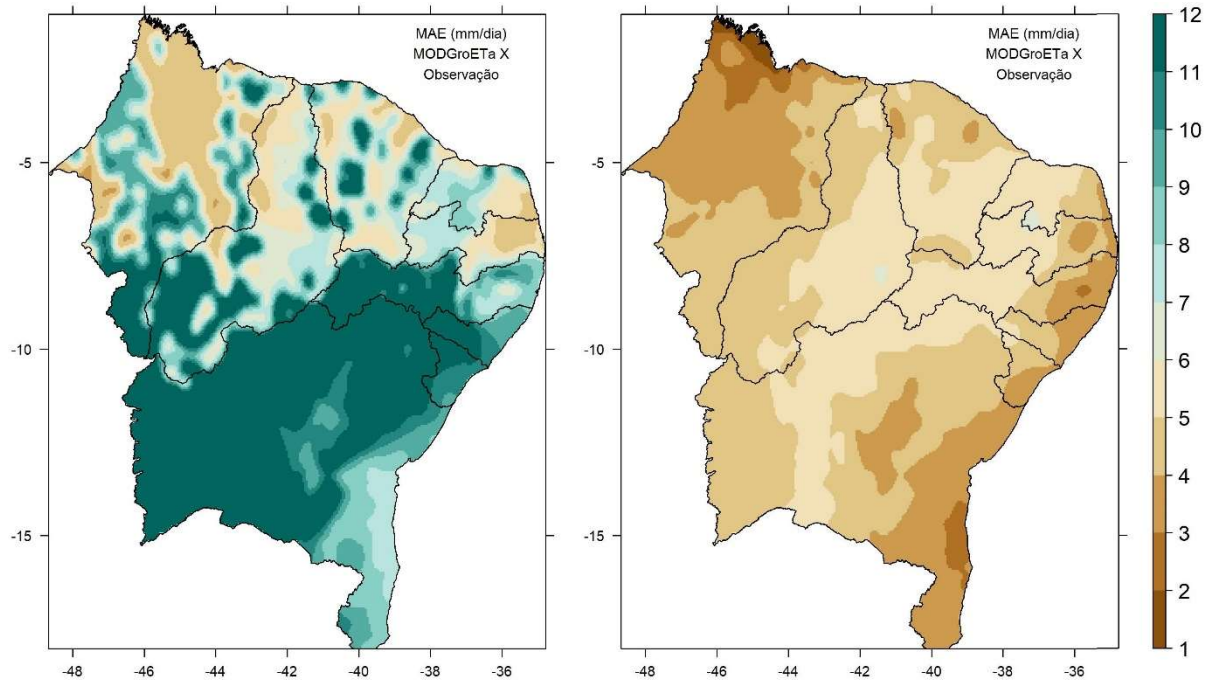


Figura 26 - MAE decenal do MODGroETa antes da correção de viés (esquerda) e após correção de viés (direita).

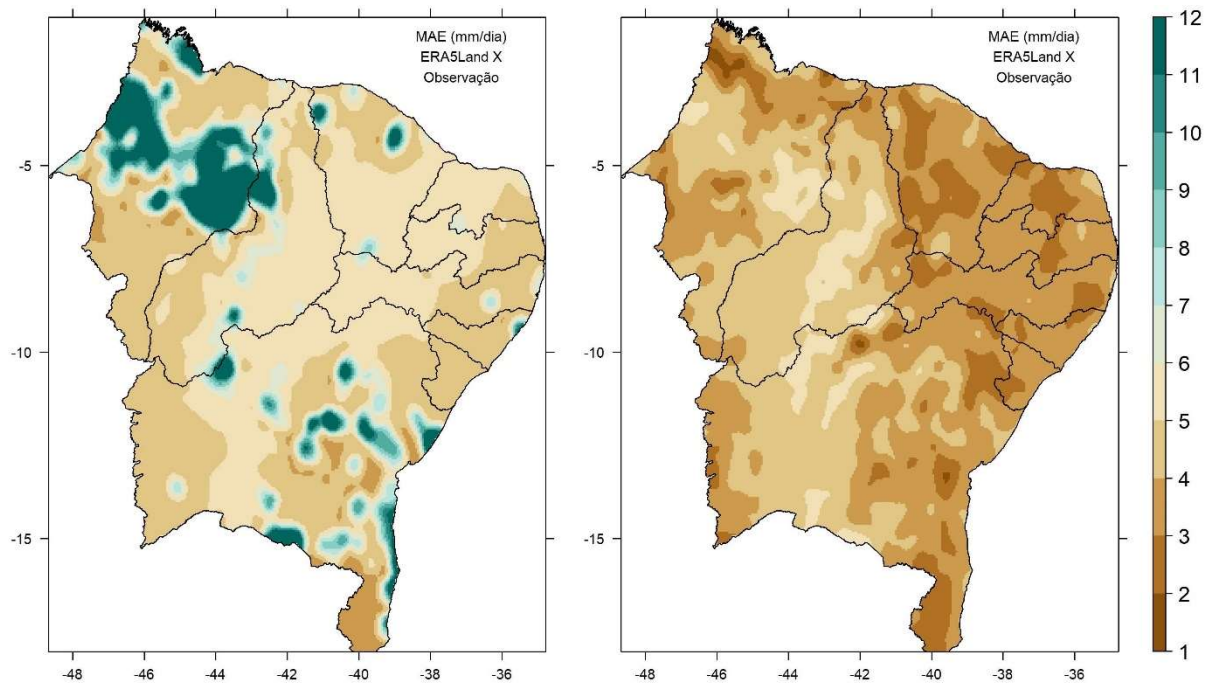


Figura 27 - MAE decenal do ERA5Land antes da correção de viés (esquerda) e após correção de viés (direita).

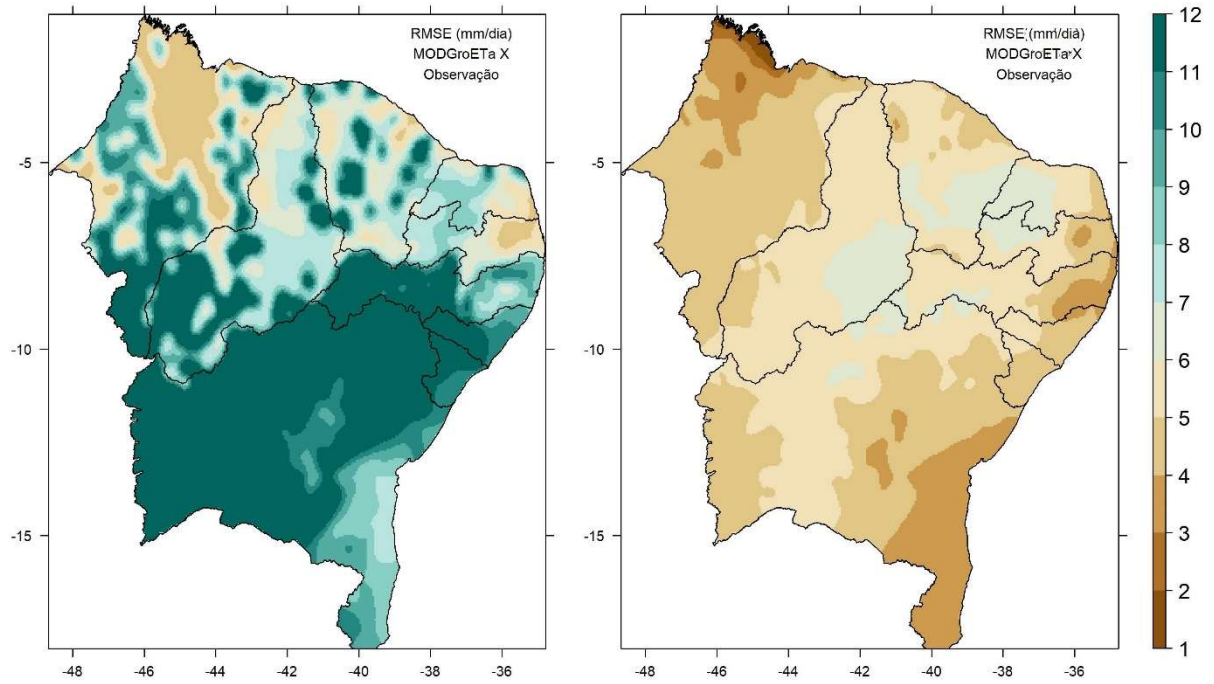


Figura 28 - RMSE decennial do MODGroETa antes da correção de viés (esquerda) e após correção de viés (direita).

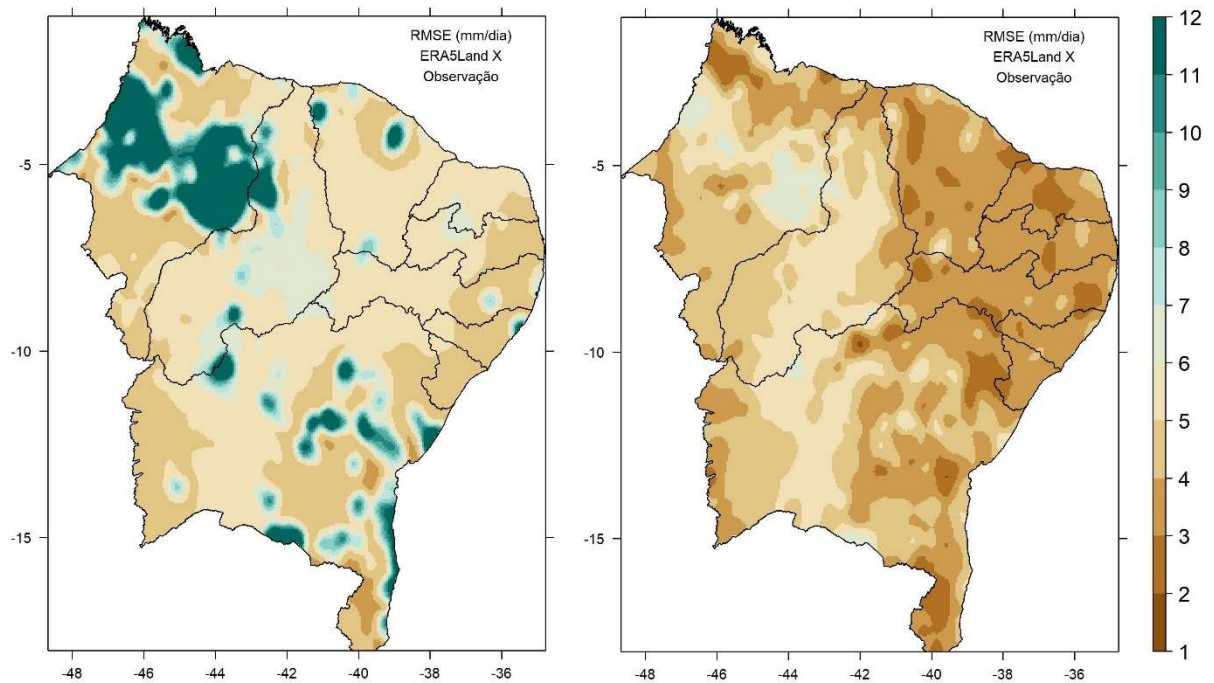


Figura 29 - RMSE decennial do ERA5Land antes da correção de viés (esquerda) e após correção de viés (direita).

5 CONCLUSÕES

A seguir, enumera-se as principais conclusões obtidas na execução dessa pesquisa:

- 1- A ET observada no NEB mostra uma clara sazonalidade, com os maiores valores sendo observados nos períodos mais secos e os menores, nos períodos mais úmidos, o que é corroborado pela maior demanda atmosférica por umidade proveniente do solo e das plantas nos períodos menos chuvosos e de maior temperatura do ar.
- 2- Analisando-se toda a extensão dos dados observados de 1961 a 2020, observa-se que a última metade desse período, 1991-2020, foi marcada por um desvio positivo em relação ao período 1961-1990, ou seja, constata um aumento da ET nos últimos 30 anos.
- 3- Pode-se separar o NEB em seis regiões homogêneas de ET, que apesar de algumas similaridades, mantém diferenças importantes entre si. Em todos os grupos, de forma geral, percebe-se tendência positiva de elevação dos valores de ET, com diferentes pontos detectados de mudança estruturas nas séries, com três grupos iniciando os padrões de mudanças na década de 1970 (anos de 1975 e 1978), e outros três grupos na década de 1990 (anos de 1991 e 1992).
- 4- Os dados de estimativa de ET do MODGroETa e ERA5Land, apresentam vieses significativos em relação as observações do período 2000-2018.
- 5- A melhor performance foi observada com a estimativa do ERA5Land, antes e após um procedimento de correlação dos vieses observados por cada fonte de dados.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREOLI, R.V.; KAYANO, M. T. Efeitos do Pacífico Tropical e do Atlântico Sul na variabilidade das chuvas no Nordeste do Brasil. *International Journal of Climatology*, v. 26, nº 13, pág. 1895-1912, 2006. DOI. 10.1002/JOC.1341.
- ARAÚJO, P.H.C. et al. Eventos climáticos extremos: efeitos dos eventos El Niño e La Niña na produção agrícola. In: BOURI, R.; COSTA, M. A. (Org.). *Brasil em desenvolvimento 2013: políticas nacionais, planejamento e sociedade*. Brasília: Pea, 2013. p. 347-362.
- CAPOZZOLI, C.R.; CARDOSO, A. de O.; FERRAZ, S. E. T. Padrões de Flutuações Fluviais nas Principais Bacias Hidrográficas Brasileiras e Integração com Indicadores Climáticos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, v. 32, pág. 243-254, 2017.
- CAVALCANTI, I. F. A. Aspectos sinóticos e de grande escala associados a fortes chuvas na América do Sul: uma revisão e estudos de caso para a primeira década do século XXI. *Pesquisa Atmosférica*, vol. 118, pág. 27-40, 2012.
- CYSNE, A. P. Vulnerabilidade de reservatórios superficiais às mudanças climáticas: o caso de rios de vazão anual altamente variável. *Revista Tecnologia*, v. 33, pág. 133-144, 2012.
- DA CUNHA, F. F.; MAGALHÃES, F. F.; DE CASTRO, M. A.; DE SOUZA, E. J. Performance of estimative models for daily Reference Evapotranspiration in the city of Cassilândia, Brazil. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.1, n1, p. 173-184, 2017.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Diretrizes para prever as necessidades de água das plantas. Roma: FAO, 1984. 178 p. (FAO. Papel de irrigação e drenagem, 24)
- FERREIRA, A. G.; MELLO, N, G. S. Principais Sistemas Atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no clima da Região. *Revista Brasileira de Climatologia*, v.1, n1, 2005
- FREIRE, F.G.C. et al. Um estudo do pico de chuva no município de Mossoró-RN, Brasil. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-Rbai*, v. 6, n.1, pág. 3-7, 2013
- FREITAS, C. M. et al. Desastres naturais e saúde: um estudo de caso no Brasil. *Ciência e Vida Juntos*, v. 19, não. 9, pág. 3645-3656, 2014.
- FRIZZONE, J. A. Análise de decisão econômica em irrigação. Piracicaba: ESALQ, 2004. 371 p. (ESALQ. Série Didática, 17).
- HOUSE, R. A. Jr. Efeitos orográficos em nuvens cumulus. *Revisão de Geofísica*, vol. 50 RG1001, 2012. DOI:10.1029/2011RG000365.
- KAYANO, M.T.; ANDREOLI, R.V.; SOUZA, R. A. F. Relação entre os modos ENSO e TSM do Atlântico Sul e seu impacto na precipitação sul-americana. *Revista Internacional de Climatologia*, v. 33, nº. 8, pág. 2008-2023, 2013.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L.; VALVERDE, M.; ROCHA, R.; LABORBE, R. Extremos climáticos localizados regionalmente no Brasil e na América do Sul no século XXI: projeções climáticas futuras usando três modelos regionais. Relatório 5, MINISTRO DO MEIO AMBIENTE - MMA, SECRETÁRIO DA BIODIVERSIDADE E FLORESTAS - SBF,

DIRETÓRIO DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE - DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos na Biodiversidade - Subprojeto: 100 Caracterização do clima atual e descrição das mudanças climáticas na área Brasil ao longo do século XXI. Brasília, fevereiro de 2007.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Mudanças futuras em temperaturas extremas e precipitação na América do Sul derivadas do sistema de modelagem climática regional PRECIS. *Revista Internacional de Climatologia*, v. 29, pág. 2241-2255, 2009.

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. Sobre a dinâmica da seca no nordeste do Brasil: Observações, teoria e experimentos numéricos com um modelo de circulação geral. *Revista de ciência atmosférica*, v. 38, não. 12, pág. 2653-2675, 1981.

MUÑOZ-SABATER, J., "ERA5-Land: Um conjunto de dados de reanálise de terras de última geração para aplicações terrestres". *Ciência. O dia*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.

SABATER, M.J., "ERA5-Earth hourly data from 1950 to 1980". Copernicus Climate Change Service (C3S) - Climate Data Store (CDS). 2021. DOI: 10.24381/cds.e2161bac. Acesso em NOVEMBRO DE 2022.

SANTOS, R. S.; COSTA, L. C.; SEDYIAMA, G.C.; LEAL, B.G.; OLIVEIRA, R. A.; JUSTINO, F. B. Avaliação das relações seca/produzitividade agrícola em cenários de mudanças climáticas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, não. 2, pág. 313-321, 2011.

SENEVIRATNE, S.I. et al. Mudanças no clima extremo e seu impacto nos ecossistemas naturais. In: Gerenciando o risco de eventos extremos e desastres para melhorar as mudanças climáticas, p. 109-230, 2012.

SERVAIN, J. Índices climáticos simples para o Oceano Atlântico tropical e outras aplicações. *Jornal de Pesquisa Geofísica: Oceanos*, vol. 96, quando C8, pág. 15137-15146, 1991.

SMITH, M. Relatório sobre a consulta de especialistas sobre a revisão dos critérios de necessidades de água para cultivos da FAO. Roma: FAO, 1991. 45 p.

SOUSA, I. F. de; SILVA, V. de P. R.; SABINO, F.G.; NETTO, A. de O.A.; SILVA, B.K.N.; AZEVEDO, P. V. de. evapotranspiração de referência aos perímetros irrigados do distrito de Sergipe. *Revista da Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 14, não. 6, pág. 633-644, 2010.

SOUZA, E; AMBRIZZI, T. Pentad Climatologia do clima no Brasil e processos atmosféricos associados. 2003. *Climanalise*, janeiro de 2003 (publicado online em <http://www.cptec.inpe.br/produts/climanalise/artigos/articien2.shtml>).

SOUZA, P.; CAVALCANTI, I. F. A. Centros de ação atmosférica associados à posição da ZCIT Atlântica. *Jornal Internacional de Climatologia: Royal Meteorological Journal Comunidade*, v. 29, quando 14, pág. 2091-2105, 2009.

TRENBERTH, K. E. Ele planeja uma maneira de relatar o clima severo através das mudanças climáticas. *Mudanças climáticas*, v. 115, pág. 283-290, 2012.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: FGRS, 2007. p. 269-278.

VALDIVIA, P. G. Monitoramento hidrogeológico da bacia piloto do Ribeirão da Onça na área fora do sistema aquífero Guarani determinação da evapotranspiração. 2005. 43 p. Trabalho de

Conclusão de Curso, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

WILLEMS, P. et al. Avaliando o impacto das mudanças climáticas na precipitação urbana e no escoamento urbano: abordagens e limitações. *Pesquisa Atmosférica*, vol. 103, pág. 106-118, 2012.