



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
DOUTORADO EM ENGENHARIA CIVIL – RECURSOS HÍDRICOS

CLEBSON DO CARMO RAIMUNDO

**ANÁLISE DE IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO SETOR DE
RECURSOS HÍDRICOS: UMA CRÍTICA SOBRE O CÁLCULO DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (ET_0) EM ESTUDOS DESTA NATUREZA**

FORTALEZA

2017

CLEBSON DO CARMO RAIMUNDO

ANÁLISE DE IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO SETOR DE RECURSOS
HÍDRICOS: UMA CRÍTICA SOBRE O CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO
POTENCIAL (E_{To}) EM ESTUDOS DESTA NATUREZA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins

Co-orientador: Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R13a Raimundo, Clebson do Carmo.

Análise de impacto das mudanças climáticas no setor de recursos hídricos: uma crítica sobre o cálculo de evapotranspiração potencial (ET_o) em estudos desta natureza / Clebson do Carmo Raimundo. – 2017. 226 f. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins.

Coorientação: Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa.

1. Evapotranspiração; . 2. Mudanças Climáticas;. 3. CMIP5; . 4. Precipitações; . 5. Vazões. I. Título.

CDD 627

CLEBSON DO CARMO RAIMUNDO

ANÁLISE DE IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO SETOR DE RECURSOS
HÍDRICOS: UMA CRÍTICA SOBRE O CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO
POTENCIAL (ET_o) EM ESTUDOS DESTA NATUREZA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em 31 / 01 / 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Dirceu Silveira Reis Júnior
Universidade de Brasília (UnB)

Prof. Dr. Jose Maria Brabo Alves
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho com todo amor e carinho a duas pessoas de significados ímpares na minha vida: a minha mãe e meu pai, Luzia Ferreira do Carmo e José Raimundo Filho, pela confiança depositada em mim pelo apoio, pela base sólida, pelo apoio nas horas difíceis e por tudo que fizeram e fazem por mim, a minha esposa (Bruna), aos meus irmãos e meus amigos que sempre torceram pelo meu futuro e acreditaram que nada é impossível quando queremos e temos força de vontade.

AGRADECIMENTOS

É impossível realizar um trabalho de pesquisa sem a ajuda e colaboração de outras pessoas. Por isso, muito grato:

Primeiramente a Deus, pela saúde, conhecimento e força de vontade.

Aos meus pais, Luzia Ferreira do Carmo e José Raimundo Filho, pessoas que tenho como exemplo de respeito, honestidade, bondade, luta, perseverança, os quais me incentivam nunca baixar a cabeça e sempre lutar em busca do melhor.

A minha esposa, Bruna A. S. do Carmo, uma pessoa especial e grande ser humano, minha companheira de luta, pela paciência (principalmente), pelo apoio, pelo carinho, por todas as horas difíceis juntos, pela superação, para que tudo isso se realizasse.

À NINA TERERÊ, pela companhia e grandes alegrias.

Ao meu avô (*in memoriam*), pelos ensinamentos da vida.

Aos meus irmãos: Fagner do Carmo Raimundo, Daniel do Carmo Raimundo, Carlos Henrique do Carmo Raimundo e Carla do Carmo Raimundo, que moram no meu coração.

Aos meus sobrinhos Kayc Neymar (o Tio), a Hemilly Victória (a Tia) e o João Lucas (Joãozinho), aos quais adoro muito e que são as fontes das alegrias de nossa família.

A todos os meus familiares e amigos em geral, pela força e incentivo.

Aos professores e colegas dos cursos de Pós-Graduação, pelos ensinamentos e amizades construídas durante o período do curso.

A meu orientador, professor Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins, pela orientação, conhecimento repassado e confiança depositada, me incentivando nas pesquisas, além da grande ajuda após o término da Bolsa, muito grato.

Ao professor Dirceu, pela grande contribuição na pesquisa.

Ao meu grande amigo e irmão, André Gonçalo dos Santos (hoje doutor Bolsista), pela grande amizade, brincadeiras e parceria ao longo do tempo de estudo (graduação, mestrado e doutorado).

Aos amigos da FUNCEME: Robson (pela imensa ajuda), Marcelo, Cassain, Junior, Alexandre Cunha, Cleiton, Giullian Reis, Sergio e André (pela ajuda e brincadeiras) e a todos do CHICO, que direta ou indiretamente contribuíram na elaboração deste trabalho.

À Socorro (Grande pessoa), pelos momentos de descontração, telefonemas, idas e vindas, à procura do Eduardo.

Aos membros da banca examinadora, pela colaboração na melhoria e

engrandecimento deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental (DEHA) da Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de auxílio ao longo do curso.

RESUMO

O objetivo do trabalho foi analisar o impacto das mudanças climáticas na evapotranspiração potencial (ET_o) a partir dos modelos do Projeto de Intercomparação de Modelos Climáticos (CMIP5) para os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Esta avaliação foi realizada para o Estado do Ceará e para o setor de recursos hídricos. Primeiramente foi realizada uma análise de falhas nos dados usados para estimar ET_o por três métodos e do efeito destas falhas nestas estimativas. Após o tratamento dos dados, foram escolhidas apenas 3 Estações para representar a variabilidade de ET_o no Estado do Ceará. Os testes de Mann-Kendall e t de *Student* não indicaram tendência na ET_o a nível semestral e anual. A ET_o estimada pelo método de Hargreaves –Samani, no clima presente, superestimou a ET_o estimada pelo método de Penman-Monteith FAO-56 no 1º semestre, e subestimou no 2º semestre, numa variação de aproximadamente entre 5% e 11% para ambos os semestres, ambas variações significativas ao nível de confiança de 7%. A evapotranspiração potencial (ET_o) foi obtida pelos métodos Penman-Monteith FAO-56, uma versão modificada deste com velocidade do vento igual a 2 m/s e pelo método de Hargreaves-Samani. Alternativamente, foi utilizado método de regressão incorporando erro do modelo adotado para obtenção de estimativas Penman-Monteith a partir da ET_o estimada por Hargreaves-Samani. A ET_o, precipitação e vazão do clima presente serviram de base para correção das variáveis correspondentes obtidas a partir dos modelos do CMIP5 no cenário atual, assim como para as projeções climáticas. Esta correção foi realizada a partir do uso da Função de Densidade Acumulada (CDF) Gama aplicada às variáveis de referência (clima presente) e às correspondentes variáveis dos modelos. No Estado do Ceará, as alterações climáticas projetadas para o final do século XXI indicam aumento da ET_o, porém pouco significativo, em ambos os semestres, nos dois cenários futuros (RCPs). Em relação às médias da ET_o de maneira geral, na Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, assim como no Ceará, as projeções dos modelos não indicaram aumento significativo para o período de 2011-2100, influenciado principalmente pela diminuição da amplitude térmica. No que se refere às precipitações, em ambos cenários RCPs apenas os modelos MRI-CGM3 e IPSL-CM5A-MR projetaram aumento bastante expressivo em relação ao clima presente, ao passo que o CanESM2 e o MIROC-ESM-CHEN projetaram redução significativa, principalmente este último. Já os demais modelos projetaram aumento e/ou diminuição discretos, permanecendo praticamente em torno das precipitações do clima presente. As projeções das vazões, por sua vez, na maioria dos modelos analisados, indicam que as mudanças climáticas impactarão de maneira expressiva na redução das vazões até o final do século XXI. Essa redução é evidente nos dois cenários RCPs. Pela análise do coeficiente de assimetria, as vazões deverão apresentar

maior frequência entre os valores mais baixos. Em relação ao Q_{90} , as mudanças climáticas ao final do século XXI, em ambos cenários futuros, implicam em uma redução neste valor de referência em relação ao presente. As reduções foram mais significativas no período 2071-2100 e para o cenário futuro RCP 8,5.

Palavras-Chave: Evapotranspiração; Mudanças Climáticas; CMIP5; Precipitações; Vazões

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the impact of climate change on potential evapotranspiration (ET_o) from the models of the Climate Model Intercomparison Project (CMIP5) for the scenarios RCP4.5 and RCP8.5. This evaluation was carried out for the State of Ceará and for the water resources sector. Firstly, an analysis was conducted on the gaps in the data used to estimate ET_o by three methods and their effect in this estimation. After the data treatment, only 3 Stations were chosen to represent the variability of ET_o in the State of Ceará. The Mann-Kendall and Student's t tests did not indicate trend in ET_o at the semester and annual level. Estimated ET_o by the Hargreaves-Samani method, in the present climate, overestimated the ET_o estimated by the FAO-56 Penman-Monteith method in the first semester, and underestimated in the 2nd semester, varying from approximately 5% to 11% for both Semesters, both changes significant at the 7% confidence level. Potential evapotranspiration (ET_o) was obtained by Penman-Monteith methods FAO-56, a modified version of this with a wind speed of 2 m/s and by the Hargreaves-Samani method. Alternatively, a regression method was used, incorporating an error of the adopted model to obtain Penman-Monteith estimations from the ET_o estimated by Hargreaves-Samani. The ET_o, precipitation and flow of the present climate served as a basis for correction of the corresponding variables obtained from the CMIP5 models in the current scenario, as well as for the climatic projections. This correction was performed using the Cumulative Density Function (CDF) Gama applied to the reference variables (present climate) and the corresponding variables of the models. In the State of Ceará, projected climatic changes towards the end of the 21st century indicate an increase of ET_o, but not significant in both semesters and two future scenarios (RCPs). Regarding ET_o means, in general, in the Alto Jaguaribe Basin, as well as in Ceará, the model projections did not indicate a significant increase for the period 2011-2100, influenced mainly by the decrease in the thermal amplitude. Regarding precipitation, in both RCP scenarios, only the MRI-CGM3 and IPSL-CM5A-MR models projected a significant increase relative the present climate, whereas CanESM2 and MIROC-ESM-CHEN projected a significant reduction, in particular, this last one. The other models, however, projected small increase and/or decrease, remaining practically around the precipitations of the present climate. The projections of the flows, in most of the analyzed models, indicate that climate changes will impact significantly in the reduction of flows until the end of the 21st century. This reduction is evident in the two RCP scenarios. By the analysis of the asymmetry coefficient, the flow rates should present a higher frequency among the lower values. The Q90 projected changes at the end of the 21st century, in both scenarios, implies in reduction relative to the present. The reductions were more significant in

the period 2071-2100 and for the future scenario RCP 8.5.

Keywords: Evapotranspiration; Climate changes; CMIP5; Precipitations; Flows

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Cenários do IPCC-AR5 e forçante radiativa antropogênica global.....	37
Figura 2	– Esquema do processo de evapotranspiração.....	38
Figura 3	– Distribuição espacial das estações do INMET no Estado do Ceará, com destaque para a localização geográfica da bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe.....	50
Figura 4	– Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, com seus reservatórios e rede hidrográfica.....	52
Figura 5	– Climatologia da precipitação na região da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, no período de 1976-2005.....	53
Figura 6	– Arcabouço geral da metodologia adotada no presente estudo.....	55
Figura 7	– Polígono de Thiessen.....	63
Figura 8	– Limites da distribuição t de student, mostrando os valores críticos para a validação do teste de tendência bicaudal.....	67
Figura 9	– Síntese da metodologia utilizada no trabalho, para a obtenção das projeções futuras da ETo e precipitação.....	82
Figura 10	– Esquema do processo de correção pela Distribuição Gama.....	83
Figura 11	– Dispersão da ETo (mm/mês) para o mês de Janeiro e Junho.....	88
Figura 12	– Dispersão da ETo (mm/mês) para o mês de Fevereiro a Maio.....	88
Figura 13	– Dispersão da ETo (mm/mês) para o período de Julho a Dezembro.....	88
Figura 14	– Modelo SMAP, versão mensal.....	90
Figura 15	– Série temporal do número de dias com dados em cada mês, com realização do Thiessen nas 12_Estações e 3_Estações no Estado do Ceará, para o período de 1976 a 2005.....	95
Figura 16	– Série temporal do número de dias superiores a 15 dias em cada mês, com realização do Thiessen nas 12_Estações e 3_Estações no Estado do Ceará, para o período de 1976 a 2005.....	96
Figura 17	– Série temporal da ETo mensal, estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56, com realização do Thiessen em 3_Estações (Pen_T3) e nas 12_Estações (Pen_T12) do Estado do Ceará, para o período de 1976-2005.....	97

Figura 18	– Série temporal da ETo mensal estimada pelo método de Hargreaves-Samani, com realização do Thiessen em 3_Estações Hag_T3 e nas 12_Estações Hag_T12 do Estado do Ceará, para o período de 1976-2005.....	98
Figura 19	– ETo mensal de cada estação, obtido com todos os dados da série, juntamente com Thiessen das 12_Estações e 3_Estações estimadas pelo método de Penman-Monteith FAO56, para o 1º semestre (a e b) e 2º semestre (c e d), no período de 1976-2005.....	99
Figura 20	– ETo mensal de cada estação, obtido com todos os dados da série, juntamente com Thiessen das 12_Estações e 3_Estações estimadas pelo método de Hargreaves-Samani, para o 1º semestre (a e b) e 2º semestre (c e d), no período de 1976-2005.....	100
Figura 21	– ETo mensal de cada estação, obtido com dados da série acima de 15 dias, juntamente com Thiessen das 12_Estações e 3_Estações estimadas pelo método de Penman-Monteith FAO56, para o 1º semestre (a e b) e 2º semestre (c e d), no período de 1976-2005.....	101
Figura 22	– ETo mensal de cada estação, obtido com dados da série acima de 15 dias, juntamente com Thiessen das 12_Estações e 3_Estações estimadas pelo método de Hargreaves-Samani, para o 1º semestre (a e b) e 2º semestre (c e d), no período de 1976-2005.....	102
Figura 23	– Média mensal da ETo acumulada no período de 1976-2005, com dados observados.....	115
Figura 24	– Climatologia das variáveis envolvidas diretamente no processo de evapotranspiração: Temperatura Máxima (tasmx); Temperatura Média (tasmed); Temperatura Mínima (tasmin) e Velocidade do Vento (vento).....	117
Figura 25	– Média anual da ETo no período de 1976-2005.....	119
Figura 26	– Boxplot da ETo mensal no período de 1976 – 2005, estimada pelos métodos de Penman (P), Hargreaves (H) e Penman (P_2ms) com velocidade do vento constante de 2m/s, para o 1º semestre.....	121
Figura 27	– Boxplot da ETo mensal no período de 1976 – 2005, estimada pelos métodos de Penman-Monteith FAO56 (P), Hargreaves-Samani (H) e	123

	Penman-Monteith FAO56 (P_2ms) com velocidade do vento constante de 2m/s, para o 2º semestre.....	
Figura 28	– Boxplot da ETo mensal, com dados observados, brutos (CanESM2) e corrigidos, no 1º semestre.....	124
Figura 29	– Boxplot da ETo mensal, com dados observados, brutos (Can-ESM2) e corrigidos, no 2º semestre.....	125
Figura 30	– Boxplot da ETo mensal, com dados observados, brutos (CNRM-CM5) e corrigidos, no 1º semestre.....	126
Figura 31	– Boxplot da ETo mensal, com dados observados, brutos (CNRM-CM5) e corrigidos, no 2º semestre.....	126
Figura 32	– Boxplot da ETo mensal, com dados observados, brutos (GFDL-ESM2G) e corrigidos, no 1º semestre.....	127
Figura 33	– Boxplot da ETo mensal, com dados observados, brutos (GFDL-ESM2G) e corrigidos, no 2º semestre.....	128
Figura 34	– Boxplot da ETo mensal, com dados observados, brutos (MIROC-ESM-CHEN) e corrigidos, no 1º semestre.....	129
Figura 35	– Boxplot da ETo mensal, com dados observados, brutos (MIROC-ESM-CHEN) e corrigidos, no 2º semestre.....	129
Figura 36	– Boxplot da ETo mensal, com dados observados, brutos (MIROC-ESM) e corrigidos, no 1º semestre.....	130
Figura 37	– Boxplot da ETo mensal, com dados observados, brutos (MIROC-ESM) e corrigidos, no 2º semestre.....	131
Figura 38	– Boxplot da ETo mensal, com dados observados, brutos (MRI-CGM3) e corrigidos, no 1º semestre.....	132
Figura 39	– Boxplot da ETo mensal, com dados observados, brutos (MRI-CGM3) e corrigidos, no 2º semestre.....	132
Figura 40	– Boxplot da ETo mensal, com dados observados, brutos (IPSL-CM5A-MR) e corrigidos, no 1º semestre.....	133
Figura 41	– Boxplot da ETo mensal, com dados observados, brutos (IPSL-CM5A-MR) e corrigidos, no 2º semestre.....	133
Figura 42	– ETo mensal estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.....	136

Figura 43	– Desvio-padrão mensal da ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.....	136
Figura 44	– ETo mensal estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.....	138
Figura 45	– Desvio padrão mensal ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.....	138
Figura 46	– ETo mensal estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.....	140
Figura 47	– Desvio padrão mensal ETo estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.....	141
Figura 48	– ETo mensal estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.....	143
Figura 49	– Desvio-padrão mensal da ETo estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.....	143
Figura 50	– ETo mensal estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.....	145
Figura 51	– Desvio-padrão mensal da ETo estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.....	146
Figura 52	– Eto mensal estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.....	147
Figura 53	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.....	148
Figura 54	– ETo média, estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56, obtida em função de Hargreaves-Samani (P(H)), para todos os modelos do CMIP5 no período histórico (1976 – 2005), em comparação entre a estimada com dados observados P_(OBS) e dados corrigidos (P_Cor.1)	155
Figura 55	– Desvio-padrão da ETo média, estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 obtido em função de Hargreaves-Samani (P(H)), para todos os modelos do CMIP5 no período histórico (1976 – 2005), em comparação entre a estimada com dados observados P_(OBS) e com dados corrigidos (P_Cor.1)	157

Figura 56	– ETo mensal estimada pelo método de P(H) no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.....	159
Figura 57	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P(H) no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.....	160
Figura 58	– ETo mensal estimada pelo método de P(H) no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.....	162
Figura 59	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P(H) no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.....	162
Figura 60	– Precipitação (Pr) mensal projetada no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.....	165
Figura 61	– Desvio padrão mensal da precipitação (Pr) projetada no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.....	165
Figura 62	– Precipitação (Pr) mensal projetada no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.....	168
Figura 63	– Desvio padrão mensal da precipitação (Pr) projetada no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.....	169
Figura 64	– Vazão (Q) mensal projetada no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.....	172
Figura 65	– Desvio padrão mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP4.5, para o período 2041-2070.....	173
Figura 66	– Assimetria mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP4.5, para o período 2041-2070.	173
Figura 67	– Vazão (Q) mensal projetada no cenário RCP8.5, para o período 2041-2070.....	176
Figura 68	– Desvio padrão mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP8.5, para o período 2041-2070.....	177
Figura 69	– Assimetria mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP8.5, para o período 2041-2070.....	177
Figura 70	– Razão entre a vazão com 90% de garantia para os períodos futuros (2011-2100) (Q90_Futuro), no cenário RCP4.5, e a vazão com 90% de garantia do período de referência de cada modelo (Q90_Presente)	180

Figura 71	– Razão entre a vazão com 90% de garantia para os períodos futuros (2011-2100) (Q90_Futuro) no cenário RCP8.5 e a vazão com 90% de garantia do período de referência de cada modelo (Q90_Presente)	181
Figura 72	– Comportamento das variáveis envolvidas no processo de estimativa da ETo, pelo método de Hargreaves-Samani, na Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, no cenário de mudanças climáticas RCP4.5.....	183
Figura 73	– Comportamento das variáveis envolvidas no processo de estimativa da ETo, pelo método de Hargreaves-Samani, na Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, no cenário de mudanças climáticas RCP8.5.....	184
Figura 74	– ETo mensal estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.....	200
Figura 75	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.....	200
Figura 76	– ETo mensal estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.....	201
Figura 77	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.....	201
Figura 78	– ETo mensal estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.....	202
Figura 79	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.....	202
Figura 80	– ETo mensal estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.....	203
Figura 81	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.....	203
Figura 82	– ETo mensal estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.....	204
Figura 83	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.....	204
Figura 84	– ETo mensal estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.....	205
Figura 85	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.....	205

Figura 86	– ETo mensal estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.....	206
Figura 87	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.....	206
Figura 88	– ETo mensal estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.....	207
Figura 89	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.....	207
Figura 90	– ETo mensal estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.....	208
Figura 91	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.....	208
Figura 92	– ETo mensal estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.....	209
Figura 93	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.....	209
Figura 94	– ETo mensal estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.....	210
Figura 95	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.....	210
Figura 96	– ETo mensal estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.....	211
Figura 97	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.....	211
Figura 98	– ETo mensal estimada pelo método de P(H) no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.....	212
Figura 99	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P(H) no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.....	212
Figura 100	– ETo mensal estimada pelo método de P(H) no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.....	213
Figura 101	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P(H) no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.....	213

Figura 102	– ETo mensal estimada pelo método de P(H) no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.....	214
Figura 103	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P(H) no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.....	214
Figura 104	– ETo mensal estimada pelo método de P(H) no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.....	215
Figura 105	– Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P(H) no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.....	215
Figura 106	– Precipitação (Pr) mensal projetada no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.....	216
Figura 107	– Desvio padrão mensal da precipitação (Pr) projetada no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.....	216
Figura 108	– Precipitação (Pr) mensal projetada no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.....	217
Figura 109	– Desvio padrão mensal da precipitação (Pr) projetada no cenário CP4.5, para o período 2071-2100.....	217
Figura 110	– Precipitação (Pr) mensal projetada no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.....	218
Figura 111	– Desvio padrão mensal da precipitação (Pr) projetada no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.....	218
Figura 112	– Precipitação (Pr) mensal projetada no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.....	219
Figura 113	– Desvio padrão mensal da precipitação (Pr) projetada no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.....	219
Figura 114	– Vazão (Q) mensal projetada no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.....	220
Figura 115	– Desvio padrão mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.....	220
Figura 116	– Assimetria mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.....	221
Figura 117	– Vazão (Q) mensal projetada no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.....	221

Figura 118	– Desvio padrão mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.....	222
Figura 119	– Assimetria mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.....	222
Figura 120	– Vazão (Q) mensal projetada no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.....	223
Figura 121	– Desvio padrão mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.....	223
Figura 122	– Assimetria mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.....	224
Figura 123	– Vazão (Q) mensal projetada no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.....	224
Figura 124	– Desvio padrão mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.....	225
Figura 125	– Assimetria mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.....	225

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de localização das estações do INMET utilizadas no estudo.....	51
Tabela 2 – Modelos do CMIP5 analisados neste estudo.....	56
Tabela 3 – Exemplo do procedimento de seleção dos dados utilizados para o cálculo da ETo.....	60
Tabela 4 – Percentual de falhas das variáveis diárias envolvidas no processo de estimativa da ETo, nas 12 estações especializadas no Estado do Ceará, no período comum de 1976 a 2005.....	61
Tabela 5 – Percentual mensal de falhas das variáveis: Temperatura Máxima, Mínima e Média (T(as)); Umidade Relativa (UR); Vento (V), para as 12 estações distribuídas no Ceará, no período de 1976 a 2005.....	61
Tabela 6 – Períodos para aplicação da Variância Média de Predição (VMP).....	87
Tabela 7 – Resultados obtidos pela Funções Objetivo, para calibração (01/1961-07/1971) e validação (01/1976-05/1986)	94
Tabela 8 – Parâmetros calibrados do modelo SMAP.....	94
Tabela 9 – Teste de hipótese aplicado as variáveis: Temperatura máxima, mínima e média, umidade relativa do ar (UR) e vento, estação por estação.....	105
Tabela 10 – Teste de hipótese aplicado ao Thiessen das variáveis: Temperaturas máxima, mínima e média, umidade relativa do ar (UR) e vento para o grupo das 12_Estações.....	106
Tabela 11 – Teste de hipótese aplicado ao Thiessen das variáveis: Temperaturas máxima, mínima e média, umidade relativa do ar (UR) e vento para o grupo das 3_Estações.....	106
Tabela 12 – Teste de hipótese aplicado a ETo semestral estimada pelos métodos: (Pen_T12), (Hag_T12) e (P_2ms_T12) para as 12_Estações.....	107
Tabela 13 – Teste de hipótese aplicado a ETo semestral estimada pelos métodos: (Pen_T3), (Hag_T3) e (P_2ms_T3) para o grupo das 3_Estações.....	108
Tabela 14 – Teste de hipótese aplicado a ETo anual estimada pelos métodos: (Pen_T12), (Hag_T12) e (P_2ms_T12) para ao grupo das 12_Estações.....	109
Tabela 15 – Teste de hipótese aplicado a ETo anual estimada pelos métodos: (Pen_T3), (Hag_T3) e (P_2ms_T3) para o grupo das 3_Estações.....	109

Tabela 16 – Teste de tendência de Mann-Kendall e Curvatura de Sen aplicado ao Thiessen das variáveis: Temperatura máxima, mínima e média, umidade relativa do ar (UR) e vento, para as 12_Estações.....	110
Tabela 17 – Teste de tendência de Mann-Kendall e Curvatura de Sen aplicado ao Thiessen das variáveis: Temperatura máxima, mínima e média, umidade relativa do ar (UR) e vento, para as 3_Estações.....	111
Tabela 18 – Teste de tendência de Mann-Kendall e Curvatura de Sen aplicado a ETo semestral estimada pelos métodos: (Pen_T12); (Hag_T12) e (P_2ms_T12) para as 12_Estações.....	112
Tabela 19 – Teste de tendência de Mann-Kendall e Curvatura de Sen aplicado a ETo semestral estimada pelos métodos: (Pen_T3); (Hag_T3) e (P_2ms_T3) para as 3_Estações.....	112
Tabela 20 – Teste de tendência de Mann-Kendall e Curvatura de Sen aplicado a ETo anual estimada pelos métodos: (Pen_T12); (Hag_T12) e (P_2ms_T12) para as 12_Estações.....	113
Tabela 21 – Teste de tendência de Mann-Kendall e Curvatura de Sen aplicado a ETo anual estimada pelos métodos: (Pen_T3); (Hag_T3) e (P_2ms_T3) para as 3_Estações....	113
Tabela 22 – Resultados das correlações entre o método de Penman-Monteith FAO56 obtido em função de Hargreaves-Samani (P(H)) e Penman-Monteith FAO56 corrigido (P_Cor.1)	155
Tabela 23 – Valores da ETo média estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56, obtido em função de Hargreaves-Samani (P(H)), para todos os modelos do CMIP5 no período histórico (1976 – 2005), em comparação com a estimada com dados observados P_(OBS).....	156
Tabela 24 – Valores dos desvios-padrão da ETo média estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 obtido em função de Hargreaves-Samani (P(H)), para todos os modelos do CMIP5 no período histórico (1976 – 2005), em comparação à estimada com dados observados P_(OBS).....	157
Tabela 25 – Percentual de variação de aumento e/ou redução da a vazão com 90% de garantia para os períodos futuros (2011-2100) (Q90_Futuro), no cenário RCP4.5 e a vazão com 90% de garantia do período de referência de cada modelo (Q90_Presente)	180

Tabela 26 – Percentual de variação de aumento e/ou redução da a vazão com 90% de garantia para os períodos futuros (2011-2100) (Q90_Futuro) no cenário RCP8.5, e a vazão com 90% de garantia do período de referência de cada modelo (Q90_Presente)	182
---	-----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ANA	Agência Nacional de Águas
VMP	Variância Média de Predição
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
ET _o	Evapotranspiração Potencial
CDF	Função de Densidade Acumulada
RCP's	Representative Concentration Pathways
CO ₂	Dióxido de Carbono
Q	Vazão
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
MCGs	Modelos de Climáticos de Circulação Global
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
SMAP	Soil Moisture Accounting Procedure
GEE	Gases do Efeito Estufa
CH ₄	Metano
N ₂ O	Óxido Nitroso
M.C.	Mudanças Climáticas
FUNCME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
netCDF	Network Common Data Format
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
TMAP	Thermal Modeling and Analysis Project
<i>OBS</i>	Observação
<i>SIGA</i>	Sistema de Informação para o Gerenciamento de Alocação de Água
PM_FAO-56	Método Penman-Monteith FAO-56
TMAX	Temperatura Máxima
TMIN	Temperatura Mínima
TMED	Temperatura Média
MK	Mann-Kendall
UR	Umidade Relativa do Ar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	31
1.1	Objetivos.....	33
<i>1.1.1</i>	<i>Geral.....</i>	<i>33</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Específicos.....</i>	<i>34</i>
1.2	Organização da Tese.....	34
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	36
2.1	Mudanças Climáticas.....	36
<i>2.1.1</i>	<i>Cenários Climáticos.....</i>	<i>36</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Evapotranspiração.....</i>	<i>38</i>
<i>2.1.2.1</i>	<i>Evapotranspiração de Referência (ETo).....</i>	<i>39</i>
<i>2.1.2.2</i>	<i>Fatores Intervenientes no Processo de Evapotranspiração.....</i>	<i>41</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Métodos de ETo utilizados em estatística de Mudanças Climáticas (MC)..</i>	<i>42</i>
<i>2.1.3.1</i>	<i>Método de Penman-Monteith FAO56.....</i>	<i>42</i>
<i>2.1.3.2</i>	<i>Método de Penman-Monteith FAO56 com velocidade do vento constante (v=2m/s)</i>	<i>43</i>
<i>2.1.3.3</i>	<i>Método de Hargreaves-Samani (1985)</i>	<i>44</i>
<i>2.1.3.4</i>	<i>Alguns Trabalhos Relacionando os Métodos Escolhidos.....</i>	<i>45</i>
2.1.4	Avaliação da habilidade (skill) dos modelos de previsão.....	49
3	ESTUDO DE CASO.....	50
3.1	Estado do Ceará.....	50
3.2	Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe.....	52
4	METODOLOGIA.....	54
4.1	Dados dos Modelos do CMIP5.....	55
<i>4.1.1</i>	<i>Extração dos Dados.....</i>	<i>57</i>
4.2	Resumo dos Procedimentos estatísticos.....	57
<i>4.2.1</i>	<i>Escolha da região de estudo.....</i>	<i>57</i>
<i>4.2.2</i>	<i>Obtenção do modelo de regressão.....</i>	<i>57</i>
<i>4.2.3</i>	<i>Calculo da Evapotranspiração Potencial ETo e projeções futuras.....</i>	<i>58</i>
<i>4.2.4</i>	<i>Cálculo da Evapotranspiração Potencial ETo, precipitações e vazões (Q) na Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe.....</i>	<i>59</i>
4.3	Análise Crítica dos Dados Básicos para Estimativa da ETo.....	59

4.3.1	<i>Seleção dos Dados</i>	59
4.3.2	<i>Disponibilidades Temporais e Espaciais de Séries de Dados</i>	62
4.3.2.1	<i>Ferramentas Computacionais</i>	62
4.3.2.2	<i>Polígono de Thiessen</i>	62
4.3.2.3	<i>Calculo da ETo mensal com série de dados acima de 15 dias</i>	63
4.3.3	<i>Análise de Tendências Temporais</i>	64
4.3.3.1	<i>Teste de hipótese de inclinação da regressão</i>	64
4.3.3.2	<i>Teste de Mann-Kendall</i>	68
4.3.3.3	<i>Estimador de declive de Sen ou Curvatura de Sen</i>	69
4.4	Teste de Hipótese para comparação de duas médias com variâncias conhecidas	70
4.5	Estimativa de Evapotranspiração Potencial	72
4.5.1	<i>Método Penman-Monteith FAO56</i>	72
4.5.1.1	<i>Parâmetros e variáveis</i>	73
4.5.1.1.1	Velocidade média do vento (U2)	73
4.5.1.1.2	Saldo de radiação (Rn)	75
4.5.1.1.3	Saldo de radiação de ondas curtas (Rns)	75
4.5.1.1.4	Radiação solar global (Rs)	76
4.5.1.1.5	Saldo de radiação de ondas longas Rnl.....	76
4.5.1.1.6	Radiação solar em dias de céu claro.....	77
4.5.1.1.7	Radiação solar no topo da atmosfera.....	77
4.5.1.1.8	Distância relativa Terra-Sol.....	77
4.5.1.1.9	Declinação solar (δ)	78
4.5.1.1.10	Ângulo horário ao pôr do sol (Ws)	78
4.5.1.1.11	Pressão parcial de vapor.....	78
4.5.1.1.12	Umidade relativa do ar (UR).....	78
4.5.2	<i>Método Penman-Monteith FAO56 com velocidade do vento constante (v=2m/s)</i>	79
4.5.3	<i>Método de Hargreaves-Samani (1985)</i>	79
4.6	Correção de Viés e Variância dos Dados Provenientes dos Modelos do CMIP5	79
4.6.1	<i>Função Densidade</i>	79
4.6.1.1	<i>Método dos Momentos</i>	80

4.6.1.2	<i>Método da Máxima Verossimilhança</i>	81
4.6.2	<i>Correção a partir da Média e Variância</i>	82
4.7	Relação entre Hargreaves-Samani e Penman-Monteith para fins de correção das estimativas de Hargreaves-Samani, a partir de Modelos Climáticos	84
4.7.1	<i>O Modelo de Regressão</i>	84
4.7.2	<i>Equação de regressão</i>	84
4.7.3	<i>Variância Média de Predição (VMP)</i>	86
4.7.4	<i>Escolha dos períodos para análise da VMP</i>	87
4.7.5	<i>Utilização da Correção</i>	89
4.8	Modelagem Hidrológica	90
4.8.1	<i>SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure)</i>	90
4.8.2	<i>Calibração e Validação do Modelo SMAP</i>	92
4.8.3	<i>Funções Objetivo</i>	93
5	RESULTADOS	95
5.1	Análise do Impacto da falta de tratamento dos dados nas conclusões sobre tendências observadas nas variáveis: temperaturas máxima, mínima, média, umidade relativa do ar, vento, além da ETo (mensal, semestral e anual)	95
5.1.1	<i>Análise da variabilidade temporal do número de dias como critério de escolha para cálculo do acumulado mensal da ETo</i>	95
5.1.2	<i>Método de Penman-Monteith FAO 56</i>	96
5.1.3	<i>Método de Hargreaves-Samani</i>	97
5.1.4	<i>Impacto da falta de tratamento dos dados na análise da ETo mensal</i>	98
5.1.4.1	<i>Análise do acumulado e dispersão da ETo mensal obtido com todos os dados da série</i>	98
5.1.4.2	<i>Análise do acumulado e dispersão da ETo mensal obtido com dados da série acima de 15 dias</i>	101
5.1.5	<i>Análise de Tendências</i>	104
5.1.6	<i>Tendência semestral das variáveis: estação por estação por (t de student)</i>	104
5.1.7	<i>Tendência semestral das variáveis: Thiessen das estações por (t de student)</i>	105
5.1.8	<i>Tendência semestral da ETo por (t de student)</i>	106

5.1.9	<i>Tendência anual da ETo por (t de student)</i>	108
5.1.10	<i>Tendência semestral das variáveis: Thiessen das estações por (Mann-Kendall sen)</i>	110
5.1.11	<i>Tendência semestral da ETo por (Mann-Kendall sen)</i>	111
5.1.12	<i>Tendência anual da ETo por (Mann-Kendall sen)</i>	112
5.2	Comparação entre Penman-Monteith FAO56 e Hargreaves-Samani, a partir de dados observados e dos Modelos Climáticos Globais	114
5.2.1	<i>Análise da Evapotranspiração (ETo) Observada no Período histórico (1976 – 2005)</i>	114
5.2.2	<i>Análise da ETo mensal</i>	114
5.2.3	<i>Análise da ETo anual</i>	118
5.2.4	<i>Boxplot da ETo mensal com dados observados</i>	120
5.2.5	<i>Análise mensal da ETo no período histórico com dados observados e dados dos Modelos do CMIP5</i>	123
5.2.6	<i>Modelo CanESM2</i>	124
5.2.7	<i>Modelo CNRM-CM5</i>	125
5.2.8	<i>Modelo GFDL-ESM2G</i>	127
5.2.9	<i>Modelo MIROC-ESM-CHEN</i>	128
5.2.10	<i>Modelo MIROC-ESM</i>	129
5.2.11	<i>Modelo MRI-CGM3</i>	131
5.2.12	<i>Modelo IPSL-CM5A-MR</i>	132
5.3	Avaliação das mudanças de clima em termos de Evapotranspiração Potencial no Estado do Ceará	134
5.3.1	<i>Estimativa da ETo por Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP4.5</i>	135
5.3.2	<i>Estimativa da ETo por Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP8.5</i>	137
5.3.3	<i>Estimativa da ETo por Hargreaves-Samani no cenário RCP4.5</i>	139
5.3.4	<i>Estimativa da ETo por Hargreaves-Samani no cenário RCP8.5</i>	142
5.3.5	<i>Estimativa da ETo por Penman-Monteith FAO56 considerando velocidade do vento constante no cenário RCP4.5</i>	144
5.3.6	<i>Estimativa da ETo por Penman-Monteith FAO56 considerando velocidade do vento constante no cenário RCP8.5</i>	146
5.3.7	<i>Breve comentário sobre os resultados</i>	149

5.4	Verificação da relação entre as Evapotranspirações Potenciais ETPs dos métodos de Penman-Monteith FAO56 e Hargreaves-Samani, para fins de obter a relação Penman-Monteith FAO56 em função de Hargreaves-Samani no cenário de mudanças climáticas.....	153
5.4.1	<i>Escolha dos períodos para análise da VMP.....</i>	153
5.5	Identificação das mudanças de clima em termos de Evapotranspiração Potencial e Precipitação na Bacia de Contribuição do Reservatório Orós.....	158
5.5.1	<i>Evapotranspiração Potencial ETo no cenário RCP4.5.....</i>	158
5.5.1.1	<i>Período de 2011-2040.....</i>	159
5.5.1.2	<i>Período de 2041-2070.....</i>	159
5.5.1.3	<i>Período de 2071-2100.....</i>	160
5.5.2	<i>Evapotranspiração no Cenário RCP8.5</i>	161
5.5.2.1	<i>Período de 2011-2040.....</i>	161
5.5.2.2	<i>Período de 2041-2070.....</i>	161
5.5.2.3	<i>Período de 2071-2100.....</i>	163
5.5.3	<i>Precipitação no Cenário RCP4.5.....</i>	163
5.5.3.1	<i>Período de 2011-2040.....</i>	163
5.5.3.2	<i>Período de 2041-2070.....</i>	164
5.5.3.3	<i>Período de 2071-2100.....</i>	166
5.5.4	<i>Precipitação no Cenário RCP8.5.....</i>	166
5.5.4.1	<i>Período de 2011-2040.....</i>	166
5.5.4.2	<i>Período de 2041-2070.....</i>	167
5.5.4.3	<i>Período de 2071-2100.....</i>	169
5.6	Avaliação dos impactos das mudanças de clima em termos das vazões afluentes ao reservatório Orós e do Potencial de Alocação (Q90)	170
5.6.1	<i>Vazão no Cenário RCP4.5.....</i>	170
5.6.1.1	<i>Período de 2011-2040.....</i>	170
5.6.1.2	<i>Período de 2041-2070.....</i>	171
5.6.1.3	<i>Período de 2071-2100.....</i>	174
5.6.2	<i>Vazão no Cenário RCP8.5.....</i>	175
5.6.2.1	<i>Período de 2011-2040.....</i>	175
5.6.2.2	<i>Período de 2041-2070.....</i>	175

5.6.2.3	<i>Período de 2071-2100</i>	178
5.6.3	<i>Potencial de Alocação (Q90)</i>	179
5.6.3.1	<i>Q90 no Cenário RCP4.5</i>	179
5.6.3.2	<i>Q90 no Cenário RCP8.5</i>	181
5.7	Análise da influência das variáveis nas projeções da ETo estimada por Hargreaves-Samani, no cenário de mudanças climáticas	182
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	185
6.1	Evapotranspiração	185
6.1.1	<i>Estado do Ceará</i>	185
6.1.2	<i>Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe</i>	186
6.2	Precipitações na Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe	188
6.3	Vazões na Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe	189
6.4	Potencial de Alocação (Q90)	189
6.5	Recomendações para estudos futuros	190
	REFERÊNCIAS	191
	APÊNDICE A	200
	APÊNDICE B	212
	APÊNDICE C	226

1 INTRODUÇÃO

As alterações nas condições climáticas previstas para o presente século têm gerado preocupação mundial, sendo o aquecimento médio global uma das grandes questões que se sobressaem neste contexto. Logo, o mundo inteiro está voltado às consequências das alterações no clima, principalmente no que diz respeito às variáveis que representam o clima, tais como: precipitação, temperatura, vento, radiação solar e umidade relativa do ar. Por conta disso, uma gama considerável de temores assola os setores da agricultura, pecuária, indústria, geração de energia, recursos hídricos e abastecimento humano, uma vez que estão inteiramente interligados a estas variáveis.

Nas condições climáticas atuais, além dos veículos de comunicação, diversas pesquisas têm mostrado que algumas regiões do planeta vêm sofrendo com extremos climáticos – ondas de frio, de calor, tempestades cada vez mais severas, abalos sísmicos etc (HUBER & GULLEDGE, 2011; KUNKEL *et al.*, 2013; PETERSON *et al.*, 2013). Não destoando desta linha, o Nordeste Brasileiro vem registrando períodos secos cada vez mais expressivos, o que afeta diretamente a disponibilidade hídrica da região. Logo, analisar, a curto, médio e longo prazo, o grau de influência das alterações climáticas nas variáveis que afetam a disponibilidade hídrica é de suma importância para os diversos setores, em especial para a agricultura e o abastecimento humano.

O Estado do Ceará, localizado na faixa equatorial do planeta, sofre influência da radiação solar praticamente o ano inteiro, tendo como consequência temperaturas consideravelmente elevadas, sendo isto mais acentuado na região do semiárido. Toda esta energia advinda do sol influencia diretamente o processo de evaporação da água presente no solo e em corpos hídricos, e a transpiração das plantas, processos que, quando somados, resultam no que se denomina *evapotranspiração*.

Assim sendo, em virtude da baixa disponibilidade dos recursos hídricos, sobretudo em regiões áridas, onde a água é o fator limitante, torna-se imprescindível a determinação desse volume de água que é “perdido” diariamente para a atmosfera, uma vez que esta informação sobre evapotranspiração torna-se indispensável para a gestão e o monitoramento dos recursos hídricos. Além disso, essa informação traz consigo um grande ganho para o sistema de Alocação de água, uma vez que os modelos hidrológicos utilizam como dados de entrada a evapotranspiração e por ser uma região que apresenta grande irregularidade pluviométrica, torna-se fundamental ter a garantia de vazão com permanência de 90% ao longo do tempo,

conhecida por (Q_{90}).

Segundo Alencar *et al.* (2011), a evapotranspiração é o principal responsável pela perda de água nas bacias hidrográficas, e exerce grande influência sobre os processos hidrológicos, sendo estreitamente relacionada à dinâmica da umidade do solo, à recarga dos aquíferos e ao escoamento superficial.

Desta forma, estudos e inovações tecnológicas são indispensáveis ao enfrentamento dos desafios do presente e do futuro da sociedade, quanto à disponibilidade e à qualidade dos recursos hídricos. Mesmo diante de inúmeras pesquisas já realizadas, nos mais diversos campos das ciências do meio ambiente que estudam o sistema solo-planta-atmosfera, tais como: Meteorologia, Hidrologia, Agrometeorologia, Agronomia, dentre outras, ainda não se chegou a um consenso em relação ao cálculo da evapotranspiração.

A evapotranspiração é o processo simultâneo de transferência natural de água no estado de vapor, da superfície do globo para a atmosfera, por evaporação e por transpiração (PEREIRA *et al.*, 2002), sendo um dos componentes mais difíceis de se quantificar no balanço hídrico.

A evapotranspiração requer suprimento de energia, que provém da radiação solar, sendo, portanto, mais elevada no verão, quando os dias são mais longos e a radiação solar incidente é maior. Nos trópicos, a energia solar e a evapotranspiração são significativamente mais elevadas que em regiões de clima temperado ao longo do ano (CAMARGO & CAMARGO, 2000).

Segundo Roque e Sansigolo (2000 *apud* MOURA, 2009), estimativas confiáveis de evapotranspiração regional são essenciais no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos para fins hidrológicos, agrícolas e ambientais. A variabilidade climática pode provocar impactos nos diversos setores: econômico, social, agrícola e no regime hidrológico de uma região.

Assim sendo, estudar a vulnerabilidade e os impactos de uma potencial modificação climática sobre os recursos hídricos, tendo como base o planejamento de medidas mitigadoras, a fim de enfrentar os reflexos disto a nível local e/ou regional, torna-se crucial. Para isso, pode-se elaborar um plano de ações emergenciais a curto, médio e longo prazos, junto aos órgãos competentes.

Segundo Adam (2011), mudanças nas variáveis de clima têm sido relacionadas à emissão de gases causadores do efeito estufa. O efeito causado na atmosfera ao interagir com os processos naturais no clima sugere futuras mudanças climáticas. Um exemplo disto seria o provável aumento de temperatura do globo devido ao aumento de emissão de CO_2 .

Muitas projeções climáticas futuras, realizadas a partir de dados de Modelos Climáticos Globais (MCG), têm o intuito de verificar os possíveis impactos no planeta e seus reflexos na sociedade de maneira geral. Segundo o 5º Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), as concentrações de CO₂, metano e óxido nítrico têm aumentado para níveis sem precedentes. Como exemplo, as concentrações de CO₂ aumentaram em 40% desde o período pré-industrial.

Apesar de existirem grandes incertezas envolvidas no processo, estes modelos são tidos por grande parte da comunidade científica como a melhor ferramenta disponível, pois, além de levarem em conta os compartimentos climáticos (atmosfera, oceanos, vegetação, solos etc.) e suas interações, permitem simular prováveis cenários de evolução do clima para vários cenários de emissões dos gases de efeito estufa (ADAM, 2011).

Neste sentido, diversas metodologias têm utilizado os resultados de eventuais mudanças nas variáveis de clima previstos pelos MCGs como dados de entrada de modelos hidrológicos, meteorológicos etc.

Para tanto, foram considerados dois cenários de mudanças climáticas, o RCP4.5 e o RCP8.5, do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5). Foi adotado a Evapotranspiração Potencial, como sendo igual a Evapotranspiração de referência, denominada de (ET_o), em mm/dia, e foram estimadas pelos seguintes métodos: (a) o método padrão estabelecido pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), conhecido por Penman-Monteith FAO56 (ALLEN *et al.*, 1998); (b) o método de Hargreaves-Samani (1985); e (c) o método de Penman-Monteith FAO56 considerando velocidade constante do vento de 2m/s.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar o impacto das mudanças climáticas na evapotranspiração potencial (ET_o) no Estado do Ceará, assim como no setor de recursos hídricos, utilizando dados dos Modelos Globais do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5), para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

1.1.1 Geral

Avaliar os impactos de possíveis cenários de mudanças climáticas (nos próximos 100 anos) na estimativa da evapotranspiração potencial (ET_o) no Estado do Ceará, além de

utilizar dados de ETo em conjunto com dados de precipitação para simular vazões futuras, através do modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo chuva-vazão, o SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*), desenvolvido por Lopes em 1981.

1.1.2 Específicos

- Análise do impacto da falta de tratamento dos dados nas conclusões sobre tendências observadas nas variáveis: temperaturas máxima, mínima, média, umidade relativa do ar, vento, além da ETo (mensal, semestral e anual);
- Comparação entre os métodos de Penman-Monteith FAO56 e Hargreaves-Samani, a partir de dados observados e de Modelos Climáticos Globais;
- Avaliação das mudanças de clima em termos de Evapotranspiração Potencial no Estado do Ceará.
- Verificação da relação entre as Evapotranspirações Potenciais ETPs dos métodos de Penman-Monteith FAO56 e Hargreaves-Samani, para fins de obter a relação Penman-Monteith FAO56 em função de Hargreaves-Samani no cenário de mudanças climáticas;
- Identificação das mudanças de clima em termos de Evapotranspiração Potencial e Precipitação, variáveis básicas da modelagem hidrológica ao nível de Bacia Hidrográfica, tendo como estudo de caso a bacia de contribuição do Reservatório Orós;
- Avaliação do impacto das mudanças de clima em termos das vazões afluentes ao Orós, e do Potencial de Alocação (Q_{90}).
- Análise da influência das variáveis nas projeções da ETo estimada por Hargreaves-Samani, no cenário de mudanças climáticas.

1.2 Organização da Tese

A tese está organizada em capítulos, em que o capítulo 1 trata de assuntos introdutórios, e dos objetivos geral e específicos. O capítulo 2 compreende a revisão de literatura, com aprofundamento dos temas relevantes para o trabalho. No capítulo 3, é apresentado um estudo de caso. O capítulo 4 trata da metodologia empregada, e o capítulo 5, dos resultados encontrados e das discussões pertinentes. E no capítulo 6, são apresentadas as

conclusões e recomendações para estudos futuros.

Ao final, são apresentadas as Referências Bibliográficas, e os Apêndices A e B, contendo as figuras referentes às evapotranspirações mensais no Estado do Ceará, e aqueles referentes à análise das variáveis ETo, precipitação e vazão para a região da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Mudanças Climáticas

O termo “mudanças climáticas” refere-se à variação do clima em escala global ou dos climas regionais da Terra ao longo do tempo. Estas variações dizem respeito a mudanças de temperatura, precipitação, nebulosidade, regime de ventos e outros fenômenos climáticos em relação às médias históricas de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), existem naturalmente na atmosfera.

No entanto, o aumento da concentração desses GEE na atmosfera provoca o aumento da quantidade de energia retida, e conseqüentemente, o aumento da temperatura da terra, também chamado de *aquecimento global* (MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2007; MORAN & MORGAN, 1997).

Já o conceito de mudanças climáticas se refere às variações no clima, por períodos prolongados (décadas ou mais), ocasionadas tanto por ações naturais quanto por ações antrópicas (IPCC, 2007a).

2.1.1 Cenários Climáticos

Os cenários do IPCC têm focado nas emissões de origem antropogênica, além de incluírem mudanças nos condutores naturais, como energia solar, atividades vulcânicas, entre outros. Na tentativa de estimar as mudanças climáticas globais, a comunidade científica criou uma ferramenta capaz de auxiliar na elaboração das hipóteses dos futuros prováveis, o que pode ser entendido como os cenários socioeconômicos futuros.

Como parte da fase preparatória para o desenvolvimento dos novos cenários para o AR5, foram criados os chamados RCPs (*Representative Concentration Pathways* – Trajetórias Representativas de Concentração), que servem como entrada para a modelagem climática e química atmosférica nos experimentos numéricos do CMIP5, sendo divididos em RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 (VAN VUUREN *et al.*, 2011).

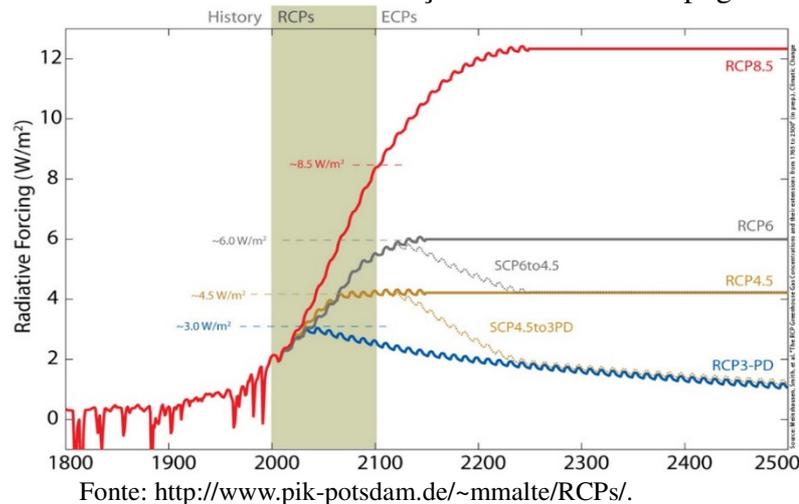
Os RCPs recebem seus nomes a partir dos níveis das forçantes radiativas, conforme relatado por cada equipe de modelagem que se encarrega da elaboração de cada cenário RCP. Assim, RCP-X implica em um cenário no qual a forçante radiativa de estabilização de pico ou ao final do século XXI corresponde a X (W.m^{-2}). Cada RCP compreende um conjunto de mudanças no uso da terra, setores de dados, e especialmente, de emissões de poluentes

atmosféricos, especificando as concentrações de gases do efeito estufa e emissões antrópicas anuais até o ano de 2100. Neste trabalho, serão usados os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para análise das projeções do século XXI.

Segundo Jones e Carvalho (2013), citados por Tayt-Sohn (2014), esses cenários foram rotulados de acordo com o nível aproximado da Forçante Radiativa em 2100, quando as concentrações de CO₂ atingem os respectivos patamares de concentrações em partes por milhão (ppm) de 421 ppm (RCP 2.6), 538 ppm (RCP 4.5), 670 ppm (RCP 6.0) e 936 ppm (RCP 8.5).

Essas forçantes radiativas globais podem ser resumidas aos seguintes valores: (a) RCP 2.6 aproximadamente 2.6W/m² (~421 ppm de CO₂ equivalente); (b) RCP 4.5 aproximadamente 4.5W/m² (~538 ppm de CO₂ equivalente); (c) RCP 6.0 aproximadamente 6.0W/m² (~670 ppm de CO₂ equivalente); e (d) RCP 8.5 aproximadamente 8.5W/m² (~936 ppm de CO₂ equivalente), podendo ser expressas graficamente, conforme mostra a Figura 1:

Figura 1 – Cenários do IPCC-AR5 e forçante radiativa antropogênica global.



Dentre os quatro cenários RCP apresentados, para este trabalho, foram escolhidos apenas dois, um com representação concentrações de CO₂ a nível intermediário (RCP 4.5), e o segundo, RCP 8.5, pelo fato de representar a maior quantidade (ou nível máximo) de concentrações de CO₂ equivalente emitido para a atmosfera, quando comparado aos outros cenários, até o ano de 2100.

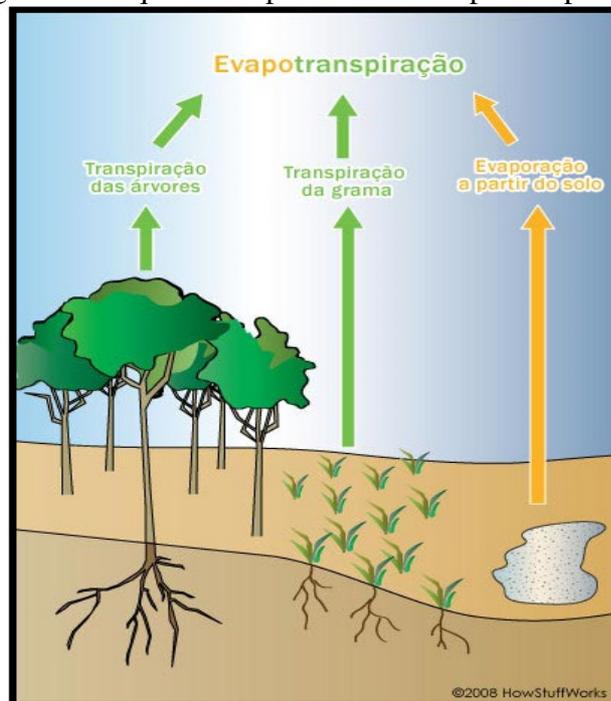
Estes cenários são fornecidos como dados de entrada aos modelos climáticos, que gerarão diferentes dados de saída, formando assim, cenários variados de mudanças climáticas, que servirão para alimentar os modelos empíricos no cálculo da ETo mensal.

2.1.2 Evapotranspiração

O conhecimento da perda d'água de uma superfície natural é de suma importância nos diferentes campos do conhecimento científico, especialmente nas aplicações da meteorologia e da hidrologia às diversas atividades humanas. Na hidrologia, o conhecimento da perda de água em correntes, canais, reservatórios, e da transpiração dos vegetais, tem muita importância no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica.

A forma usual de se quantificar a água a ser aplicada ao longo do ciclo de uma cultura agrícola é considerar os processos de evaporação do solo e de transpiração da planta conjuntamente, ao que se denomina *evapotranspiração* (SILVA & RAO, 2006). Segundo Pereira *et al.* (1997), evapotranspiração (ET) é o termo utilizado para expressar a ocorrência simultânea dos processos de evaporação e transpiração (Figura 2), que são controlados pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água do solo às plantas.

Figura 2 - Esquema do processo de evapotranspiração.



Fonte: <http://ambiente.hsw.uol.com.br/arvores-afetam-clima1.htm>

A evapotranspiração é um dos principais componentes do ciclo hidrológico, e a precisão na sua estimativa é de importância para diversos estudos, como balanço hidrológico, projetos e manejo de sistemas de irrigação, simulação de produtividade de culturas e planejamento e gerenciamento de Recursos Hídricos. A determinação da quantidade de água

necessária para atender às necessidades hídricas das culturas irrigadas, aliada a um correto dimensionamento do sistema de irrigação, é um dos principais parâmetros para o uso sustentável dos recursos hídricos na agricultura (ESTEVEZ *et al.*, 2010).

Os métodos de se quantificar o volume de água a ser aplicada nas culturas levam em consideração os processos de evaporação do solo e de transpiração da planta (BORGES & MEDIONDO, 2007). A evapotranspiração é um processo natural de perda de água do solo e da planta para a atmosfera, constituindo-se em um parâmetro de grande relevância para o manejo agrícola (SANTOS *et al.*, 2008). Como os processos (evaporação e transpiração) ocorrem separadamente, mas existe uma dificuldade de distingui-los (ALLEN *et al.*, 1998), eles geralmente são analisados em conjunto, por meio da evapotranspiração.

A evapotranspiração pode ser determinada (ou estimada) de diferentes maneiras. De acordo com Miranda *et al.* (2001), ela pode ser mensurada utilizando métodos diretos, ou estimada por meio de informações climáticas.

No primeiro grupo, estão incluídos os diferentes tipos de lisímetros e o balanço de água no solo. No segundo, estão enquadrados os métodos teóricos e empíricos, como os de Penman (1948), Thornthwaite (1948), Blaney-Criddle (1950), Jensen-Haise (1963), Priestley-Taylor (1972), Hargreaves (1977), e os evaporímetros como o tanque “Classe A” (Sentelhas, 2003), e as equações de Monteith (1965), Doorenbos-Pruitt, (1977), Hargreaves-Samani (1985) e Penman-Monteith FAO56 (ALLEN *et al.*, 1998). Contudo, o método de Penman-Monteith FAO56 é considerado como padrão para estimativa da ETo, por englobar os parâmetros físicos que governam as trocas de energia.

2.1.2.1 *Evapotranspiração de Referência (ETo)*

Segundo Cardoso (2009), a taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência, sem falta de água, é chamada de “evapotranspiração de uma cultura de referência” ou “evapotranspiração de referência” (ETo), tendo como superfície de referência uma cultura totalmente coberta com uma grama hipotética de tamanho uniforme, com altura de 12 cm, resistência de superfície com valor fixo de 70 s.m^{-1} e albedo 0,23.

Os métodos para a estimativa da ETo são geralmente dependentes de diversas variáveis atmosféricas, a exemplo do método de Penman-Monteith, parametrizado no boletim 56 da FAO (ALLEN *et al.*, 1998). Segundo Souza *et al.* (2010), a ETo é uma variável relevante para o planejamento de irrigação. Em geral, os métodos de estimativa da ETo são baseados em variáveis climáticas, como temperatura, radiação ou uma combinação destes.

Muitas estações meteorológicas disponibilizam somente séries históricas de pluviometria e termometria. No entanto, existe a necessidade do emprego de métodos que utilizem apenas a temperatura do ar como variável de entrada para o cálculo da ETo, dentre os quais podem ser citados: Thornthwaite, Camargo, Linacre e Hargreaves-Samani (STONE & SILVEIRA, 1995; PEREIRA *et al.*, 1997; SAMANI, 2000).

A determinação da evapotranspiração de potencial utilizando métodos combinados tende a superestimar a ETo, um pouco em regiões áridas e muito em regiões úmidas (ALLEN *et al.*, 1989).

Nas pesquisas que envolvem recursos hídricos, existe uma exigência para a estimativa da ETo em períodos maiores, ou seja, de duração anual ou, no máximo, mensal. Já em projetos de manejo de irrigação, é exigido um período mais curto, de 3 a 10 dias, sendo necessária a adoção de um método preciso para aquela condição (MACHADO & MATOS, 2000).

No entanto, é de grande importância o conhecimento dos métodos mais simples de estimativa da evapotranspiração potencial, que requerem dados de fácil obtenção e baixo custo (BONOMO, 1999). Mesmo com a complexidade de aquisição de dados meteorológicos para a estimativa da evapotranspiração potencial, alguns métodos possuem resultados mais precisos, como o método PM_FAO56.

Produtores rurais em manejo de projetos de irrigação nem sempre dispõem desses dados meteorológicos para a utilização de métodos mais complexos de estimativa da ETo, tornando necessária a utilização de métodos mais simples (CONCEIÇÃO, 2010). Existe, também, a necessidade de calibração destes métodos para locais específicos, de modo que os mesmos possam fornecer resultados mais confiáveis (MOHAWESH, 2010).

Pela facilidade na obtenção de dados, os métodos baseados na temperatura do ar têm sido frequentemente usados e recomendados, devido à simplicidade dos cálculos e por exigirem poucos dados de entrada (KHOOB, 2008), destacando-se Hargreaves e Blaney-Criddle (TRAJKOVIC & KOLAKOVIC, 2009).

Vale ressaltar que esses métodos mais simplificados podem apresentar correções locais de caráter diário, semanal, mensal ou sazonal, o que pode afetar a precisão de sua estimativa.

Mendonça *et al.* (2003) observaram que o método de Hargreaves superestima a ETo e o método de Blaney-Criddle subestima a ETo em locais de clima úmido. No entanto, a confiabilidade na estimativa da evapotranspiração potencial pelos métodos simplificados pode ser definida pelo grau de aproximação com o valor estimado pelo método padrão PM_FAO56.

Chow (1964 *apud* MOURA, 2009) alerta que os métodos para determinação da evapotranspiração não devem ser utilizados indiscriminadamente para todas as condições, pois a maioria das equações foi elaborada e calibrada para locais de clima específico. Assim, nenhum método que utilize dados meteorológicos é universalmente adequado para as todas as condições climáticas, a não ser que haja ajuste local ou regional destes dados (TURCO *et al.*, 2008).

Por outro lado, a seleção da melhor técnica para uma situação em particular é, em grande parte, função da disponibilidade de dados.

2.1.2.2 Fatores Intervenientes no Processo de Evapotranspiração

Dentre os fatores que têm influência sobre o processo de evapotranspiração, podem ser citados:

- A temperatura, em conjunto com a umidade relativa, condiciona a pressão de vapor, agindo com fatores ligados ao gradiente de vapor, entre a superfície e o ar vizinho a ela (VILLELA & MATTOS, 1975);
- A umidade relativa influencia na demanda evaporativa da atmosfera, sendo que, quanto maior a umidade relativa, menor a demanda evaporativa e, portanto, menor a evapotranspiração (PEREIRA *et al.*, 1997);
- O vento interfere no transporte advectivo de energia, e na renovação das massas de ar das proximidades da superfície evaporante, substituindo as massas de ar com elevado grau de umidade por massas de ar de menor umidade (VILLELA & MATTOS, 1975; PEREIRA *et al.*, 1997);
- A evapotranspiração é controlada pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água do solo às plantas (PEREIRA *et al.*, 1997);
- Temperaturas da superfície e do ar elevadas, baixa umidade, condições de céu claro e alta velocidade dos ventos são fatores que, quando combinados, contribuem para elevar a taxa de evapotranspiração (BEZERRA, 2006);
- A evapotranspiração varia em função de fatores relacionados à cultura, como a arquitetura foliar, características das folhas, duração do ciclo e época do cultivo (BERNARDO, 1995);
- Variações nos fatores de cultura, como altura e rugosidade da planta, albedo, cobertura do solo e características radiculares da planta, fornecem diferentes

taxas de evapotranspiração, mesmo sob condições climáticas iguais (ALLEN *et al.*, 1998); e

- A área foliar influencia o consumo de água pelas plantas e que, à medida que aumenta o índice de área foliar, aumenta a evapotranspiração máxima (WREGE & LUNARDI, 2006). O mesmo foi verificado por Radin *et al.* (2000), que relataram a interferência do índice de área foliar na evapotranspiração.

2.1.3 Métodos de ETo utilizados em estatística de Mudanças Climáticas (MC)

2.1.3.1 Método de Penman-Monteith FAO56

Segundo Santos (2010), dentre os métodos de estimativa da evapotranspiração, o método de Penman, na década de 1940, ganhou grande destaque, sendo o primeiro a propor um modelo que retratava os efeitos do balanço de energia com aqueles do poder evaporante. Entretanto, o método de Penman ainda não incluía a função de resistência da superfície para a transferência de vapor.

Anos mais tarde, Monteith incluiu essa função, fazendo uma analogia à *lei de Ohm* para circuitos elétricos, dando origem à equação que seria reconhecida por especialistas décadas depois (em 1990), após revisão dos diversos métodos de estimativa da evapotranspiração recomendados pela FAO (FAO, BOLETIM 24), como sendo o método padrão para estimativa da evapotranspiração potencial (ETo).

Os especialistas chegaram a essa conclusão devido ao melhor desempenho da equação de Penman-Monteith na estimativa da evapotranspiração de uma área coberta com grama com 12 cm de altura, resistência aerodinâmica da superfície de 70 s.m^{-1} e albedo de 0,23 (SMITH *et al.*, 1990).

Segundo Allen *et al.* (1994b), essa cultura foi escolhida devido às suas características serem bem definidas, facilmente adaptada e disponível para validação de novos modelos. Assim sendo, esse método ficou conhecido como método Penman-Monteith FAO56.

A equação Penman-Monteith FAO56 estima a ETo a partir de dados climáticos, como temperatura (média, máxima e mínima), umidade relativa do ar, velocidade do vento, dentre outras, conciliando não somente os aspectos aerodinâmicos e termodinâmicos, mas incluindo também a resistência ao fluxo de calor sensível e vapor d'água no ar, e a transferência de vapor d'água.

Esse método é recomendado como padrão porque tem se mostrado consistente para

estimar a ETo em diferentes locais e climas, além de considerar todos os parâmetros que governam as trocas de energia e o fluxo de calor latente. Outro aspecto é que a maioria dos parâmetros podem ser medidos ou estimados a partir de dados meteorológicos (ALLEN *et al.*, 1998).

Embora recomendado pela FAO como método padrão, a equação de Penman-Monteith FAO56 apresenta um nível de exigência de dados de entrada que dificulta sua aplicação, pois, em algumas regiões, nem sempre estes dados estão disponíveis (FERNANDES, 2006).

Esta dificuldade tem motivado o estudo de outros métodos simplificados e equações empíricas. Recentemente, métodos que associam o balanço de energia e o poder evaporante do ar têm sido desenvolvidos com o objetivo de melhorar a estimativa da evapotranspiração (CARDOSO, 2009).

Mesmo diante das dificuldades apresentadas, o método de Penman-Monteith FAO56 é bastante utilizado para avaliação de outros métodos (MOURA, 2009).

2.1.3.2 Método de Penman-Monteith FAO56 com velocidade do vento constante ($v=2\text{m/s}$)

Silva *et al.* (2013) analisaram a influência de diferentes valores fixos da velocidade do vento, de 1,0; 1,5; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5 e 5 m.s⁻¹ na estimativa da ETo obtida pelo método de Penman-Monteith FAO56. Porém, detectaram que o melhor desempenho foi encontrado com os valores fixos de velocidade do vento de 2,0 e 2,5 m.s⁻¹, superestimando a ETo com dados completos em apenas 1,31% (0,10 mm.dia⁻¹) e 6,83% (0,30 mm.dia⁻¹), respectivamente.

Carvalho *et al.* (2013), utilizando o método de Penman-Monteith FAO (FAO-PM) como método padrão na estimativa de Eto, comparou-o com o método Penman-Monteith Simplificado (ETo-FAO-PM). Esse nome foi dado por ter utilizado apenas dados de temperatura máxima e mínima, e velocidade do vento constante de 2m/s, para a região de Lavras, Minas Gerais, Brasil. Os autores concluíram que o método alternativo simplificado ETo-FAO-PM tem tendência de superestimar o método padrão FAO-PM (com entrada de dados completa), e esta aplicação tem maior validade para períodos de três meses.

Alencar *et al.* (2015), realizando um estudo de estimativa da evapotranspiração potencial ETo padrão FAO, para o estado de Minas Gerais, com ausência de alguns dados climáticos, utilizando dados diários no período de 2000 a 2005, adotaram o valor de 2m/s para velocidade do vento, e também verificaram que o método de Penman-Monteith FAO56 tendeu a superestimar a ETo obtida com os dados completos em 0,14 mm/dia, em média, para todas as

localidades. Uma explicação dada pelos próprios autores seria de que a velocidade média do vento na localidade ser inferior ao valor de 2m/s.

Lima (2005), analisando dados fixos de velocidade do vento (1, 2, 3 e 5 m/s), na região de Minas Gerais, para a estimativa da evapotranspiração potencial ETo, concluiu que os resultados da evapotranspiração potencial, determinados somente com a utilização das temperaturas máxima e mínima e velocidades do vento de 1 e 2m/s, foram satisfatórios em grande parte das regiões mineiras, principalmente na região Leste do Estado.

Ainda segundo o referido autor, a velocidade do vento é um elemento climático relevante no cálculo da evapotranspiração, pois o processo de remoção do vapor de água depende, em grande parte, do vento e da turbulência que translada o ar sobre a superfície evaporante, principalmente em regiões áridas e ventosas (POPOVA *et al.*, 2006).

2.1.3.3 Método de Hargreaves-Samani (1985)

Em 1985, Samani propôs uma modificação no método de Hargreaves, e incrementou na equação valores de temperatura máxima e mínima, e substituiu a radiação solar global pela radiação no topo da atmosfera. Este método é utilizado quando não existem dados de umidade relativa do ar e velocidade do vento.

Infelizmente, há um número limitado de estações meteorológicas nos quais estas variáveis são medidas de modo eficiente, principalmente na região mais central do Brasil. Portanto, a busca por métodos alternativos que demandem menos variáveis meteorológicas para estimar a ETo tem sido uma solução viável para contornar esse problema.

Um método alternativo que vem sendo utilizado em vários estudos (FOOLADMAND *et al.*, 2008; GAVILÁN *et al.*, 2006; TRAJKOVIC, 2007) é a equação de Hargreaves (HARGREAVES & SAMANI, 1985). Embora esta equação seja utilizada para estimar a ETo para períodos semanais ou maiores, existem estudos que ilustram que essa equação ajustada pode estimar com acurácia a ETo diária (ALLEN, 2003; FOOLADMAND *et al.*, 2008; HARGREAVES; TRAJKOVIC, 2007).

De acordo com Materán (2006), a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) propõe vários métodos de estimativa de evapotranspiração potencial (ETo): o de Penman-Monteith FAO56, o de Penman modificado, o da Radiação e o tanque Classe A, dentre outros. No entanto, em locais com pouca disponibilidade de dados climáticos, a FAO recomenda o método de Hargreaves-Samani, o qual é baseado em dados de temperaturas máxima e mínima (ALLEN *et al.*, 1988).

Os métodos indiretos, que se baseiam na temperatura do ar, têm sido bastante utilizados. com a justificativa principal de exigir apenas os poucos dados disponíveis em grande parte das estações meteorológicas (TUCCI, 2004; VAREJÃO & SILVA, 2005).

Existem diversos métodos baseados na temperatura, dentre eles o método de Thornthwaite, Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani e Thornthwaite modificado. Segundo Battiston e Tucci (2003 *apud* MOURA, 2009), os métodos baseados na temperatura do ar devem ser utilizados, exclusivamente, quando se dispõe apenas desta variável.

Em contrapartida, Varejão e Silva (2005) criticam a utilização desses métodos, especificamente no que tange à equação de Thornthwaite, alertando que este método fornece apenas uma aproximação da ordem de grandeza que se deseja conhecer, pois não considera inúmeros fatores intervenientes ao processo da evapotranspiração.

2.1.3.4 *Alguns Trabalhos Relacionando os Métodos Escolhidos*

Conceição e Mandelli (2005) avaliaram os métodos de Hargreaves-Samani, Camargo, Thornthwaite e Thornthwaite Modificado, baseados na temperatura, e os métodos de Makkink e Radiação, baseados na radiação, comparando-os com o método de Penman-Monteith FAO56, utilizando um coeficiente de desempenho, resultante da multiplicação do coeficiente de correlação e de exatidão. Os autores concluíram que os métodos baseados na radiação apresentaram melhor desempenho que os métodos baseados na temperatura. Dentre os baseados na temperatura, o de Hargreaves-Samani apresentou o melhor desempenho.

Pilau *et al.* (2012), ao avaliar o desempenho de vários métodos de estimativa de ETo, com dados integrados na escala diária e nas escalas de 5, 10, 15 e 30 dias, e comparando com o método de Penman-Monteith FAO56, nos municípios de Frederico Westphalen e Palmeira das Missões, localizados no Estado do Rio Grande do Sul, mostraram que quando se dispõe apenas de dados de temperatura do ar para o cálculo da ETo, na escala diária, os métodos de Camargo e Thornthwaite modificado por Camargo podem ser usados para Frederico Westphalen, e o de Hargreaves-Samani e Thornthwaite modificado por Camargo para Palmeira das Missões, devem preferencialmente serem adotados.

Silva *et al.* (2015) utilizando dados diários para estimativa da evapotranspiração potencial pela equação de Hargreaves-Samani no Estado do Ceará, Brasil, concluíram que, quando se dispõe apenas de dados de temperatura do ar, o método de Hargreaves-Samani (1985) foi melhor avaliado para a estimativa da ETo, recomendando-se a substituição do método padrão Penman-Monteith FAO56 por este, nas localidades de Crateús, Iguatu, Jaguaruana,

Morada Nova, Quixeramobim e Sobral. Sua aplicação não é, entretanto, recomendada para regiões litorâneas, como Acaraú e Fortaleza, ou serranas, como Guaramiranga.

Utilizando ferramenta computacional, Silva *et al.* (2005) desenvolveram um programa denominado SEVAP, para estimativa da ETo em escala diária e mensal, através dos métodos de Penman-Monteith FAO56, Hargreaves, Jansen-Haise, Linacre, Makkink, Priestley e Taylor, tanque Classe A e Thornthwaite. Os autores admitiram o método de Penman-Monteith FAO56 como referência, e compararam seus resultados com os resultados dos demais métodos, concluindo que, na ausência de dados de insolação e velocidade do vento, a evapotranspiração pode ser estimada pelo método de Hargreaves, em substituição ao método de Penman-Monteith FAO56.

Turco *et al.* (2008) avaliaram os erros da estimativa da ETo em função da combinação dos erros das variáveis que compõem as equações de Makkink, Hargreaves, tanque Classe A, Radiação solar e Penman-Monteith FAO56. Os métodos foram comparados com Penman-Monteith FAO56 (método de referência), e os resultados encontrados apontaram que o melhor ajuste foi do método de Hargreaves.

Alencar *et al.* (2015), calculando a evapotranspiração potencial ETo para a região do Estado de Minas Gerais, somente com dados de temperaturas máximas e mínimas do ar, concluíram que o método de Penman-Monteith, calculado na ausência de dados, apresentou melhores resultados do que o de Hargreaves-Samani. A única exceção encontrada pelos autores foi o município de Monte Azul-MG.

Henrique e Dantas (2007) propuseram equações para o cálculo da ETo baseadas na correlação entre os dados obtidos pelas equações de Penman-Monteith FAO56, Linacre e Hargreaves, e os dados de amplitude térmica diária, dada pela diferença entre as temperaturas máxima e mínima. Os melhores resultados foram obtidos através da correlação com o método de Hargreaves.

Mendonça *et al.* (2003) utilizaram um lisímetro de pesagem, dotado de célula de carga, para a estimativa da ETo, e para comparar os resultados com aqueles obtidos pelos métodos de Penman-Monteith FAO56, Makkink, Linacre, Hargreaves-Samani, Radiação Solar, e tanque Classe A. Dentre outros resultados encontrados, os autores destacaram que o método de Hargreaves-Samani apresenta boa precisão e pode ser utilizado para a região de Campos dos Goytacazes-RJ, quando se dispõe apenas de dados de temperatura, sobretudo para períodos de 7 e 10 dias.

Queiroz *et al.* (2011) analisaram o desempenho da estimativa dos valores diários da evapotranspiração potencial, obtidos por meio do método de Penman Monteith FAO56 e do

método de Hargreaves-Samani, para o semiárido pernambucano. Os autores concluíram que o método de Hargreaves-Samani pode ser empregado pelos produtores rurais da região com resultados bastante razoáveis.

Amorim *et al.* (2011) utilizaram como padrão o modelo de Penman-Monteith FAO56 para a estimativa da evapotranspiração potencial ETo, e avaliaram a eficiência de estimativa da ETo por métodos que requerem dados mínimos climáticos para cinco estações meteorológicas do Estado de Alagoas. Os métodos avaliados foram Hargreaves-Samani, Camargo e Thornthwaite, nas escalas de 10 dias e mensal. As estações localizavam-se na região do litoral (municípios de Maceió e Porto de Pedras), no Agreste (Palmeira dos Índios) e no Sertão do Estado (Água Branca e Pão de Açúcar).

Os resultados indicaram que, para a região de Água Branca, todos os métodos podem ser utilizados. Para Maceió, somente Hargreaves-Samani e Camargo apresentaram bons resultados. Para os municípios de Palmeiras dos Índios e Pão de Açúcar, todos os métodos foram satisfatórios, e para Porto de Pedras, somente Camargo apresentou boa resposta.

Souza (2011) avaliou métodos de estimativa da evapotranspiração potencial para fins de manejo de irrigação, tendo como objetivo comparar o desempenho de cinco métodos empíricos com o de Penman-Monteith para as condições climáticas da região de Piraí do Sul no Estado do Paraná. Para tanto, foram utilizados dados meteorológicos registrados por uma plataforma de coleta de dados durante o período de 04/07/2008 a 12/10/2008 em uma cultura de trigo. Os resultados indicam que a ETo pode ser estimada adequadamente pelos métodos da Radiação Solar, Jensen-Haise e Makkink. Já os métodos de Hargreaves e Camargo não foram indicados por este autor devido ao desempenho ruim dos mesmos.

Silva *et al.* (2014b) analisou o desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial para a ilha de Fernando de Noronha, Pernambuco, constatando que o método de Hargreaves mostrou resultados confiáveis, tendo seu uso recomendado para a ilha, pois apresentou o melhor desempenho para estimativa diária da ETo quando comparado ao método de Penman-Monteith FAO56.

Moura *et al.* (2013) avaliaram a estimativa da potencial ETo por métodos indiretos em várias escalas de tempo na bacia experimental do riacho Gameleira, Vitória de Santo Antão, Pernambuco, no período de 2004 a 2009. Os métodos indiretos foram avaliados tendo como padrão o método Penman-Monteith FAO56. Dentre os métodos baseados na temperatura do ar, Hargreaves-Samani (1985) apresentou desempenho “ótimo” nas escalas pentadal a mensal, seguido de Blaney-Cridle com desempenho “muito bom”.

Queiroz *et al.* (2011) avaliou o desempenho da estimativa da evapotranspiração

potencial ETo no Semiárido Pernambucano, calculada através do método padrão PM_FAO56, comparado ao método de Hargreaves-Samani e o método de Penman Monteith, usando apenas temperatura do ar. Para o cálculo da pressão de vapor, os autores utilizaram uma temperatura mínima média de 2,5°C. Este valor correspondeu à média da temperatura sugerida pelo boletim da FAO56, que recomenda que em regiões semiáridas, sejam retidos entre 2 e 3 °C nos valores de temperatura mínima.

Os autores observaram que os métodos apresentaram um desempenho moderado, recomendando o método de Hargreaves-Samani, em relação ao método Penman Monteith, usando apenas temperatura do ar, concluindo que esse método, relativamente mais simples, pode ser empregado com facilidade pelos produtores rurais.

Barros *et al.* (2007) avaliaram a estimativa da evapotranspiração potencial ETo para a região de Seropédica, RJ, correlacionando medidas obtidas em lisímetros de pesagem com os métodos de Penman-Monteith FAO56, Hargreaves-Samani, Camargo, Priestley-Taylor e Makking. Os valores de ETo estimados por Penman-Monteith FAO56, Priestley-Taylor e Makking se mostraram bem correlacionados com aqueles determinados pelo lisímetro de pesagem. Neste trabalho, o método de Hargreaves-Samani não estimou satisfatoriamente a ETo, e o método de Camargo não apresentou ajuste satisfatório com os dados do lisímetro para observações agrupadas em pequenos períodos.

Carvalho *et al.* (2006) compararam as estimativas da ETo por métodos empíricos e pelo método padrão Penman-Monteith FAO56, com medidas de lisímetro em Seropédica, RJ. Os resultados indicaram desempenhos ótimo, muito bom e sofrível para os métodos Penman-Monteith FAO56, Tanque Classe A e Hargreaves-Samani, respectivamente. O baixo desempenho do método de Hargreaves-Samani se justifica pelo fato de ter sido desenvolvido para regiões semiáridas, com elevado déficit de saturação, condição climática diferente da observada em Seropédica, cujo clima é úmido (OLIVEIRA & CARVALHO, 1998; Fietz *et al.*, 2005).

Em seu estudo, Araújo *et al.* (2007) objetivaram estimar a evapotranspiração potencial mensal por diferentes métodos, a saber: Thornthwaite, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Penman-Monteith FAO56, Tanque Classe A e Makkink. O método Penman-Monteith FAO56 foi adotado como padrão. O método de Blaney-Criddle atendeu satisfatoriamente à estimativa da ETo na região de Boa Vista, Roraima, para o período mensal. Os autores concluíram que, quando se dispõe somente de dados de temperatura (máxima e mínima), os métodos de Thornthwaite e Hargreaves-Samani podem ser usados, com a ressalva de superestimarem os valores de ETo ao longo do ano. O método do Tanque Classe A mostrou-se

adequado somente durante o período seco.

Fernandes *et al.* (2011) avaliaram, calibraram e validaram o método de estimativa da ETo de Hargreaves para o município de Manaus. Neste trabalho, tanto para a calibração como para a validação, houve uma tendência de superestimativa dos valores de ETo em relação aos valores obtidos pelo método padrão Penman-Monteith FAO56.

Costa *et al.* (2011) estimaram a ETo pelos métodos de Hargreaves e Blaney-Criddle, e comparam os resultados com os Penman-Monteith FAO56, na bacia do Córrego Sujo, localizada em Teresópolis, região serrana do Estado do Rio de Janeiro. Nesta bacia, a atividade agrícola utiliza a irrigação de forma indiscriminada para produção de olericultura. Nenhum dos métodos alternativos ao FAO56 apresentou resultado satisfatório, isto é, com baixo erro, o que reforça a necessidade para ajuste regional dos mesmos. Todos os métodos apresentaram erros superiores a 30%.

Silva *et al.* (2011) avaliaram diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial para Monte Alegre de Minas – MG, a saber: Thornthwaite, Camargo, Priestley-Taylor e Hargreaves-Samani. Os valores estimados por esses métodos foram confrontados com aqueles obtidos pelo método Penman-Monteith FAO56. O método de Priestley-Taylor apresentou o melhor resultado, porém, com índice de desempenho sofrível. O pior desempenho foi apresentado pelo método de Hargreaves-Samani, seguido pelos métodos de Thornthwaite e Camargo, todos com índice de desempenho péssimo.

2.1.4 Avaliação da habilidade (*skill*) dos modelos de previsão

Com relação à avaliação da habilidade dos modelos do CMIP5 em prever o observado, Silveira *et al.* (2013), avaliando modelos do CMIP5 para Região Nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia do Prata, constataram que os modelos conseguiram representar de forma consistente o ciclo anual e as variações interanuais, no entanto, quando avaliado na escala interdecadal, a maioria dos modelos mostraram muita dificuldade. Outra avaliação dos modelos CMIP5 foi realizada na bacia do Rio São Francisco e de acordo com Martins *et al.* (2016) e Silveira *et al.* (2016), dentre os modelos avaliados, estão os envolvidos neste trabalho, então destes, apenas o IPSL-CM5A-MR mostrou-se inferior aos demais na representação da Sazonalidade da precipitação.

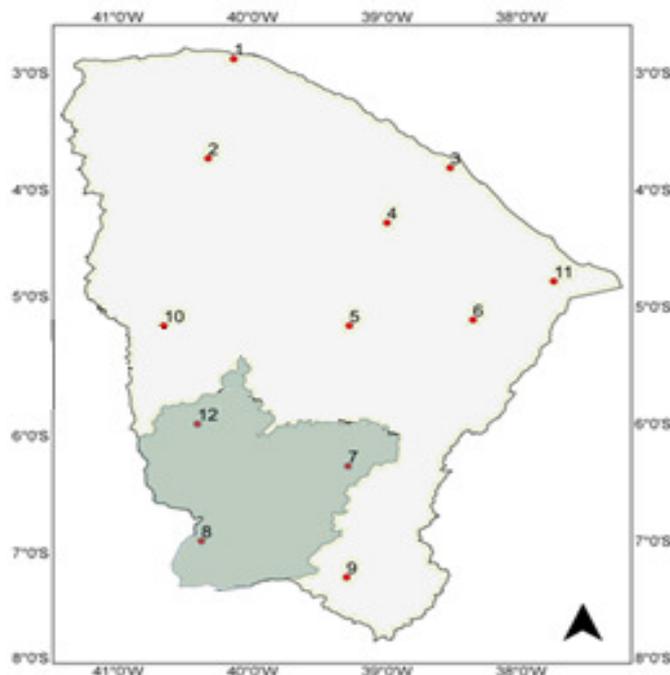
3 ESTUDO DE CASO

3.1 Estado do Ceará

O presente estudo foi realizado no Estado do Ceará, localizado na região Nordeste do Brasil, e que possui alta vulnerabilidade em relação a fenômenos de secas, apresentando irregularidade pluviométrica ao longo do ano. Seu período chuvoso compreende os meses de Janeiro a Abril, tendo o mês de Março como o mais chuvoso. De acordo com Oliveira *et al.* (2013), o Ceará apresenta uma predominância de clima, segundo a classificação climática de Köppen: BSw'h', ou seja, em aproximadamente 80% da área como semiárido quente.

Os dados meteorológicos para este estudo foram coletados de 12 estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que possuem boa distribuição espacial, conforme pode ser visualizado na Figura 3. Os dados de localização das estações, código, municípios e informações de georreferenciamento estão listados na Tabela 1.

Figura 3 – Distribuição espacial das estações do INMET no Estado do Ceará, com destaque para a localização geográfica da bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os dados de precipitação foram obtidos junto à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Já os dados modelados foram extraídos dos Modelos Climáticos de Circulação Global (MCGs), provenientes das saídas do *Coupled Model*

*Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)*¹.

O período para o qual foi determinada a estimativa da evapotranspiração potencial ETo compreendeu os meses de Janeiro de 1976 a Dezembro de 2005, perfazendo 30 anos. Já as projeções foram estendidas para os seguintes períodos: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100.

Tabela 1 – Dados de localização das estações do INMET utilizadas no estudo.

ESTAÇÃO	CÓDIGO	MUNICÍPIO	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE (m)
1	82294	Acaraú	-2,88	-40,13	16,50
2	82392	Sobral	-3,73	-40,33	109,62
3	82397	Fortaleza	-3,75	-38,54	26,45
4	82487	Guaramiranga	-4,28	-39	870,67
5	82586	Quixeramobim	-5,16	-39,28	79,50
6	82588	Morada Nova	-5,11	-38,36	43,62
7	82686	Iguatu	-6,36	-39,29	217,67
8	82777	Campos Sales	-7	-40,38	583,50
9	82784	Barbalha	-7,31	-39,29	409,03
10	82583	Crateús	-5,16	-40,66	296,82
11	82493	Jaguaruana	-4,78	-37,76	11,72
12	82683	Tauá	-6	-40,41	398,77

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os dados de vazão para calibração do modelo hidrológico SMAP, foram obtidos da estação fluviométrica de Iguatu, ao qual representa um grande percentual de vazão da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe.

Os dados observados foram utilizados para definir o cenário de referência (período histórico 1976-2005), que será comparado aos cenários futuros, considerando alterações climáticas. As variáveis meteorológicas consideradas foram aquelas necessárias para a determinação da evapotranspiração potencial, pelo método Penman-Monteith FAO56 (PM_FAO56) (ALLEN *et al.*, 1998), Hargreaves-Samani (HS) (1985) e Penman-Monteith FAO56 com velocidades constante de 2m/s (P_2ms).

Os dados diários observados e modelados foram: temperatura do ar (média, máxima e mínima), umidade relativa do ar, velocidade do vento a 2 metros. Para o conjunto de dados modelados, a diferença estava na velocidade do vento, que foi considerada a uma altura de 10

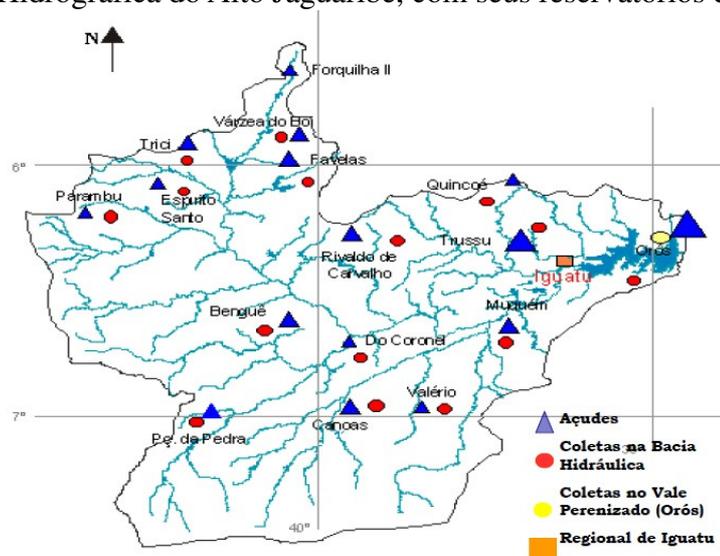
¹ Os dados do CMIP5 estão disponíveis em <<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5>>.

metros do solo. Para tanto, foi necessário converter a velocidade do vento de 10 m para 2m, conforme será discutido mais adiante. A fim de avaliar o efeito da velocidade do vento como sendo constante e de 2m/s na estimativa da ETo, foi necessário assumir que a velocidade do vento seria de 2m/s, e que apresentaria valores semelhantes em toda a área de estudo.

3.2 Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe

A Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe está localizada a montante do açude Orós, e abrange uma área de drenagem de 24.639 km², o que corresponde a 16,56% do território cearense. Conforme pode ser visualizado na Figura 4, esta bacia é composta por 24 municípios, e os 18 açudes públicos, monitorados quantitativamente e qualitativamente pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), apresentam capacidade de acumulação de águas superficiais de 2.792.563.000 m³.

Figura 4 - Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, com seus reservatórios e rede hidrográfica.

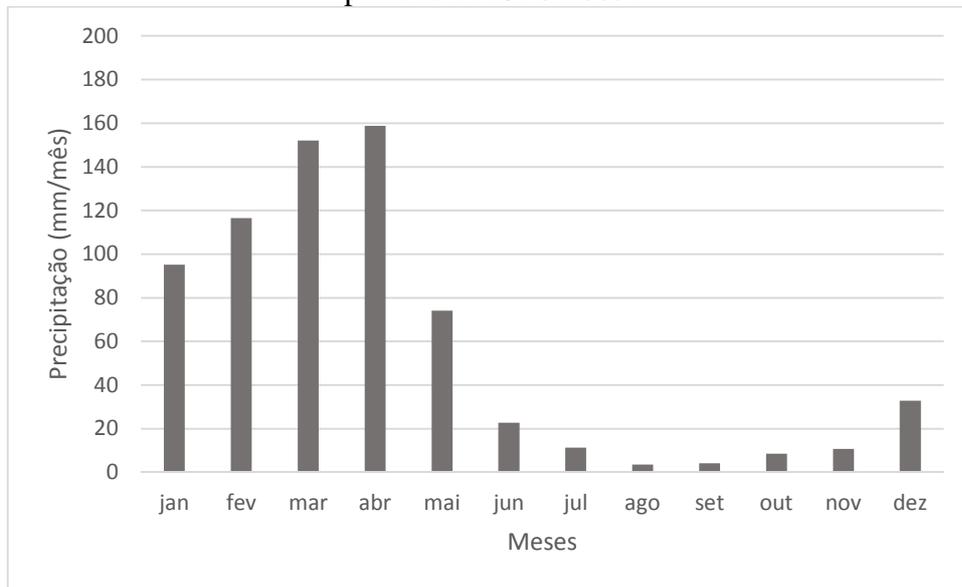


Fonte: Portal da COGERH.

O maior reservatório em termos de acumulação de água Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe é o açude Orós, localizado no município homônimo, com uma capacidade total de 1.940.000.000 de m³, e o menor reservatório, dentre os monitorados pela COGERH, é o açude do Coronel, localizado em Antonina do Norte, com capacidade de 1.770.000 de m³.

A região apresenta um período chuvoso que se estende de Janeiro a Maio, sendo os meses de Março e Abril os mais chuvosos, conforme a climatologia da região (Figura 5).

Figura 5 – Climatologia da precipitação na região da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, no período de 1976-2005.



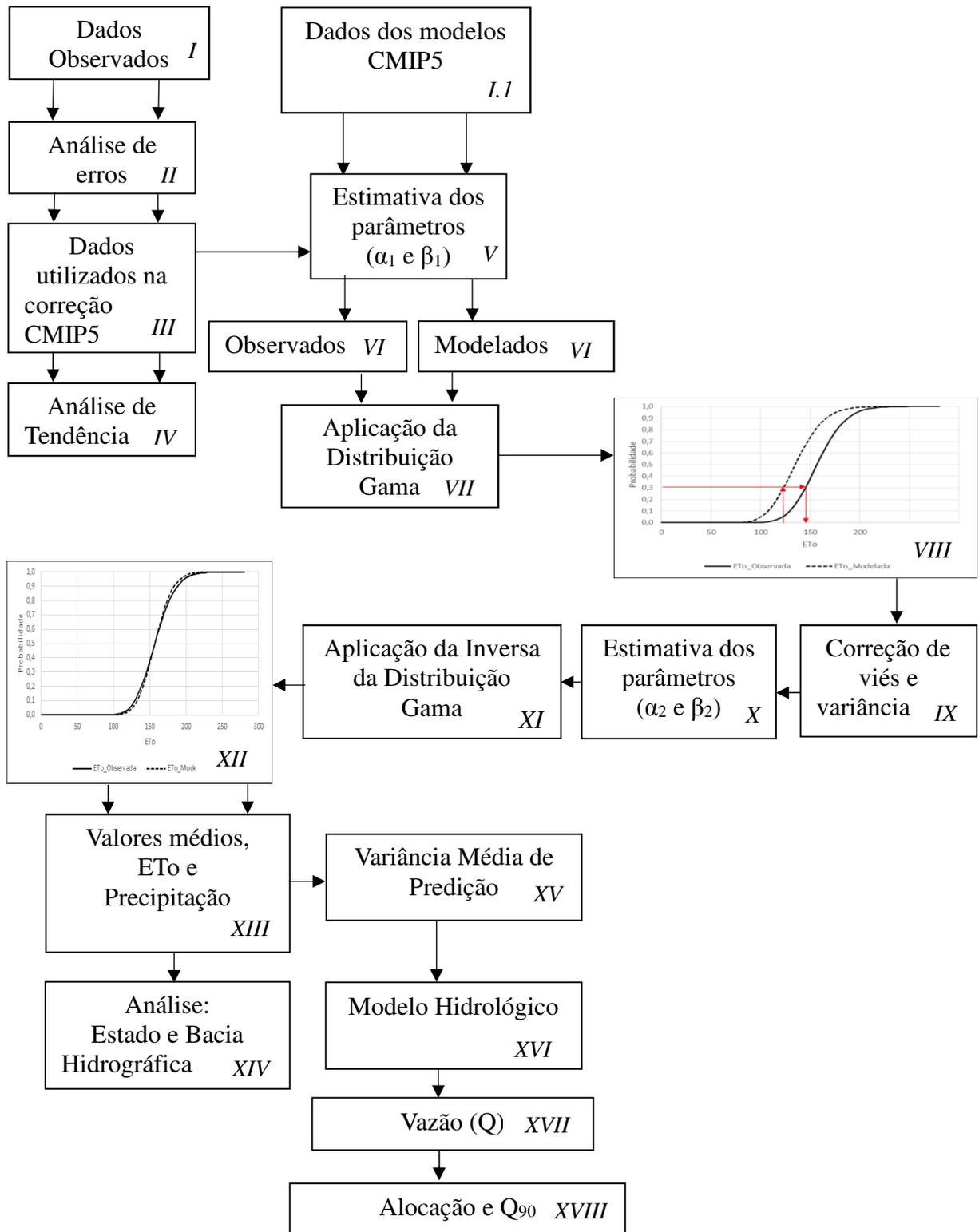
Fonte: Elaborado pelo Autor.

4 METODOLOGIA

Toda a metodologia adotada neste trabalho pode ser sintetizada em um passo a passo, conforme mostra a Figura 6 e com descrição logo abaixo.

Em posse dos dados observados (I) e modelados (I.1), foi necessário a análise de erros (II) para verificar influência de falhas, com isso procurou-se manter um padrão comum a todos os dados, em relação aos dias que continham todas as variáveis, em seguida foi calculado a estatística descritiva para os dados observados (I) e modelados (I.1), como média e desvio padrão. Para tanto, com essas estatísticas, os dados observados foram utilizados para correção dos modelos do CMIP5 (III), e na aplicação dos testes de tendência e hipótese nas variáveis envolvidas no processo de estimativa da ETo, além da ETo mensal, semestral, anual (IV), sendo os testes aplicados apenas com dados observados (I), além de serem utilizados para obtenção dos parâmetros (α_1 e β_1) (V) com dados observados e modelados, sendo este (V) início do processo de correção de todas as variáveis envolvidas nesta pesquisa (temperatura máxima, mínima, média, vento, ETo, vazão (Q)). Estimados os parâmetros observados e modelados (VI), aplicou-se a distribuição Gama VII) e obteve-se as curvas função de densidade acumulada (CDF) (VIII), em seguida as variáveis passaram pelo processo de correção do viés e da variância (IX), assim obtendo-se os parâmetros (α_2 e β_2) (X), onde na sequência, aplicou-se o inverso da distribuição Gama (XI), com finalidade de aproximar a curva CDF observada à curva modelada (XII), assim obtendo-se a variável corrigida no período futuro. Após esse passo (XII), foram extraídas novas médias e desvios padrão das variáveis corrigidas (XIII) para análise do impacto das mudanças climáticas nas variáveis a nível do Estado do Ceará e na escala de bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe (XIV), além da aplicação da Variância Média de Predição (XV), com objetivo de obter a menor variabilidade possível da ETo nos períodos selecionados ao longo do ano (janeiro e junho, quadra chuvosa (fevereiro a abril) e julho a dezembro (período seco)), afim de obter como resultado final, através do modelo hidrológico SMAP (XVI), as vazões (Q) (XVII) e as vazões de garantias com permanência de 90% do tempo (Q_{90}) (XVIII).

Figura 6 – Arcabouço geral da metodologia adotada no presente estudo.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.1 Dados dos Modelos do CMIP5

Os dados dos MCGs do CMIP5 compõem o 5º relatório do IPCC-AR5 (*Fifth*

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change), publicado em Setembro de 2013. Os dados provenientes do CMIP5 são resultados de simulações de modelos globais de um número reduzido de centros de pesquisa que contribuem para produção dos relatórios dos IPCC (ver Tabela 2), simulações estas, forçadas pelas concentrações observadas dos gases de efeito estufa durante o século XX.

Tabela 2 – Modelos do CMIP5 analisados neste estudo.

MODELO	RESOLUÇÃO	INSTITUIÇÃO OU GRUPO QUE REALIZOU A MODELAGEM
CanESM2	2.8 ° x 2.8 °	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
CNRM-CM5	1,4 ° x 1,4 °	Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique
GFDL-ESM2G	2.0 ° x 2.5 °	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
IPSL-CM5A-MR	1.3 ° x 2.5 °	Institut Pierre-Simon Laplace
MIROC-ESM-CHEM	2.8 ° x 2.8 °	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies
MIROC-ESM	2.8 ° x 2.8 °	-
MRI-CGCM3	1.1 ° x 1.1 °	Meteorological Research Institute

Fonte: http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/CMIP5_modeling_groups.pdf

Os MCGs são rodados em uma resolução bastante grosseira, que varia entre 100 e 350 km (Tabela 2), visto que são feitas simulações para todo o globo terrestre. Para trazer a informação para a escala da bacia hidrográfica, é necessário implementar o processo conhecido como desagregação dos dados, denominado *downscaling*, que pode ser dinâmico ou estatístico.

Para cada modelo, foram considerados diferentes membros, conforme disponibilizados pelo CMIP5. Na aquisição dos dados dos MCGs, foi selecionado o código das configurações das simulações disponibilizadas, conforme mostrado logo abaixo:

{r1i1p1}

Em que:

{r1i1p1} = “rodada” 1, com inicialização 1 e física 1 do modelo “model”;

r = “rodadas”, com a mesma física e condições iniciais diferentes;
i = inicializações diferentes, com implicações físicas; e
p = perturbação na física.

4.1.1 Extração dos Dados

Os dados de temperatura máxima, mínima, média, umidade relativa do ar e vento dos MCGs foram extraídos através do *software ferret*, do formato netCDF (Network Common Data Format) para o formato texto. O *ferret*² é um ambiente interativo de visualização e análise, projetado para atender às necessidades de oceanógrafos e meteorologistas que trabalham com grandes e volumosos conjuntos de dados em grade. Foi desenvolvido pelo *Thermal Modeling and Analysis Project (TMAP)* no *Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL)* da *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*.

Indicado para aplicações em Oceanografia e Meteorologia, ele possui código livre, compilações disponíveis para as principais plataformas (Linux, Windows, Mac...), e é operado (quase) exclusivamente por linhas de comandos, possuindo suporte a *scripts* e funções externas.

4.2 Resumo dos Procedimentos estatísticos

4.2.1 Escolha da região de estudo

A fim de verificar se fatores como, por exemplo, proximidade com o Equador ou região costeira, influenciariam nos resultados da ETo, optou-se por dividir o Estado de Ceará ao meio, mas, diante das simulações da ETo realizadas, verificou-se que não havia diferença média significativa entre a ETo estimada nas duas áreas após a divisão. Preferiu-se, então, adotar, na primeira parte da pesquisa, a análise da ETo para todo o Estado do Ceará, para o período histórico considerado (1976-2005) e para as projeções futuras (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) dos modelos do CMIP5.

4.2.2 Obtenção do modelo de regressão

Para analisar a correlação existente entre os dados de ETo resultantes da aplicação dos métodos apresentados, os dados de ETo observados foram submetidos à análise estatística.

² O *ferret* pode ser facilmente encontrado na página web <http://ferret.pmel.noaa.gov/>, onde formato de arquivo suportado é o netCDF (é o formato padrão), mas existem as extensões: (.nc) e (.cdf). Exemplo de arquivo netCDF com extensão (.nc): *tas_day_CNRM-CM5_historical_r1i1p1_19850101-19891231.nc*.

Assim sendo, para avaliar a precisão dos métodos na escala mensal, durante o período histórico de 1976 a 2005, com o uso de dados observados e modelados, utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2) da regressão linear entre ETo estimadas por Hargreaves-Samani, Penman-Monteith FAO56.

Para a validação do Modelo de Regressão Simples, primeiramente foi calculada a ETo média, através do polígono de Thiessen com o uso do *software* SIGA, tanto para os dados observados quanto para os modelados. A fim de mitigar o problema da representatividade dos modelos em relação às variáveis de clima presente, principalmente aquelas envolvidas na estimativa pelo método de Penman-Monteith FAO56, foi aplicado o método da Variância Média de Predição (VMP), para fins de correção das estimativas de Hargreaves-Samani a partir de Modelos Climáticos.

A aplicação do método da VMP se deu na seleção de diferentes períodos ao longo do ano. No entanto, quanto menor o valor da VMP melhor a correlação entre os métodos e menor a incerteza.

4.2.3 *Calculo da Evapotranspiração Potencial ETo e projeções futuras*

Para o cálculo da evapotranspiração de potencial (período histórico e projeções futuras), foi utilizado Penman-Monteith FAO56 (ALLEN *et al.*, 1998) como método padrão, e Hargreaves-Samani (1985) para comparação. A evapotranspiração futura foi estimada a partir dos dados de umidade relativa do ar, temperaturas máxima, mínima e média, e velocidade do vento a 10m de altura, extraídas dos MCGs nos cenários RCP4.5 e RCP8.5.

A velocidade do vento foi convertida de 10m para 2m, pois esta última era uma exigência do método de Penman-Monteith FAO56 (ALLEN *et al.*, 1998). De posse dos grupos de dados já extraídos, estimou-se a evapotranspiração mensal futura para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100.

Após obter os dados de variáveis climáticas futuras, foram aplicadas, em cada modelo, as equações empíricas de Penman-Monteith FAO56, Hargreaves-Samani e Penman-Monteith FAO56, considerando a velocidade do vento constante de 2m/s, a fim de obter os valores de evapotranspiração futura para cada um dos períodos acima citados, nos cenários RCP4.5 e RCP8.5. Para as projeções climáticas da evapotranspiração potencial, primeiramente foram corrigidos os dados dos modelos CMIP5, com uso da distribuição Gama, aplicação da função de densidade acumulada (CDF).

4.2.4 Cálculo da Evapotranspiração Potencial ETo, precipitações e vazões (Q) na Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe

Para tanto, primeiramente foi calculada a evapotranspiração potencial ETo, pelos métodos de Hargreaves-Samani e Penman Monteith FAO56, para a bacia do Alto Jaguaribe, assim como a precipitação média através do método de Thiessen. Em seguida, foi aplicada a metodologia de correção para ETo e precipitação, através da distribuição Gama, e para verificar o grau de assimetria das vazões em cada um dos períodos de projeções climáticas, nos dois cenários RCPs, foi aplicado do coeficiente de assimetria de Pearson.

Assim sendo, com o uso de modelos climáticos MCGs para estimar as condições climáticas futuras nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, torna-se imprescindível a necessidade de prognóstico da evapotranspiração, precipitação e das vazões, através dos MCGs, a curto (2011-2040), médio (2041-2070) e longo (2071-2100) prazos.

Desta forma, tem-se uma ideia do comportamento futuro dessas variáveis na bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe e de maneira geral para Estado do Ceará. Estes prognósticos são de suma importância, auxiliando os tomadores de decisão, uma vez que políticas estratégicas devem ser tomadas para que os diversos setores, como gestão dos recursos hídricos, irrigação, abastecimento urbano, políticas de combate à seca, dentre outros, atenuem seus impactos até o final do século.

Por fim, foram avaliadas as projeções dos modelos do CMIP5, e seus impactos na geração de vazões na Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, identificando mudanças de clima em termos de Evapotranspiração Potencial e Precipitação, variáveis básicas a serem utilizadas na modelagem hidrológica ao nível de Bacia Hidrográfica, para o estudo de caso ora realizado, na Bacia de Contribuição do Reservatório Orós, além de identificação dos impactos das mudanças de clima em termos das vazões afluentes ao reservatório Orós e do Potencial de Alocação (Q₉₀), ou seja, vazões com a garantia de permanência de 90% do tempo.

4.3 Análise Crítica dos Dados Básicos para Estimativa da ETo

4.3.1 Seleção dos Dados

Em razão do grande volume de falhas observadas nos dados das séries utilizadas, para que os mesmos não comprometessem o cálculo da estimativa da ETo, foi preciso adotar um procedimento na escolha das séries coletadas no período de 1976 a 2005. Conforme aponta

a Tabela 3, o dia 4 foi escolhido na série aí mostrada, por apresentar dados para as cinco variáveis. Os demais dias foram descartados e não incluídos nas análises.

Portanto, todas as variáveis possuem o mesmo número de dias com dados disponíveis para o cálculo da ETo, resultando nos percentuais de falha apresentados na Tabela 4. Dentre as estações avaliadas, apenas três apresentaram um percentual baixo dessas falhas: Estação_3 (Fortaleza - litorânea), Estação_8 (Campos Sales – região sul do Estado), e Estação_12 (Tauá). Estas serão utilizadas posteriormente na comparação da ETo estimada por todo o grupo das 12 estações.

Tabela 3 – Exemplo do procedimento de seleção dos dados utilizados para o cálculo da ETo.

Jan-1991	DIA1	DIA2	DIA3	DIA4	DIA5
T_{max}	32,5	-	33,0	31,5	-
T_{med}	28,6	-	26,7	27,5	28,0
T_{min}	-	22,0	-	23,0	21,5
UR	-	66,7	78	90,0	-
Vento	2,8	3,4	-	3,5	1,8

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Diante deste contexto, surgiu a necessidade de verificar o percentual de falhas de cada mês. Para isso, foi elaborada uma tabela com as 12 estações, juntamente com o percentual de falhas de cada variável em cada mês (ver Tabela 5). Foi possível concluir que os menores percentuais foram encontrados nas três estações citadas anteriormente (ver Tabela 4). Vale salientar que todas as variáveis possuem o mesmo número de falhas correspondentes a cada estação.

As estações com dados observados foram escolhidas de acordo com os dados disponíveis para realização dos cálculos. Para estimativa da Evapotranspiração potencial ETo, em mm/dia, foram utilizados os métodos de Penman-Monteith FAO56 (ALLEN *et al.*, 1998) e o método de Hargreaves-Samani (1985).

Os dias que apresentavam falhas em qualquer variável nos dados coletados foram descartados no cálculo da ETo mensal. As análises aqui discutidas são baseadas em médias de 30 anos para ambas as simulações referentes aos dias atuais e cenários de aquecimento global.

Tabela 4 – Percentual de falhas das variáveis diárias envolvidas no processo de estimativa da ETo, nas 12 estações especializadas no Estado do Ceará, no período comum de 1976 a 2005.

Estações	Variáveis diárias com % falhas				
	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Temperatura média	Vento	UR
Estação_1	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Estação_2	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
Estação_3	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
Estação_4	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
Estação_5	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
Estação_6	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Estação_7	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Estação_8	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
Estação_9	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
Estação_10	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
Estação_11	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Estação_12	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
Total de dados	10.950	10.950	10.950	10.950	10.950

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 5 – Percentual mensal de falhas das variáveis: Temperatura Máxima, Mínima e Média (T(as)); Umidade Relativa (UR); Vento (V), para as 12 estações distribuídas no Ceará, no período de 1976 a 2005.

Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Estação_1	0,62	0,63	0,57	0,57	0,60	0,65	0,71	0,66	0,60	0,53	0,53	0,52
Estação_2	0,54	0,56	0,53	0,59	0,55	0,59	0,68	0,73	0,71	0,62	0,60	0,59
Estação_3	0,35	0,42	0,43	0,43	0,40	0,41	0,43	0,47	0,49	0,40	0,30	0,38
Estação_4	0,55	0,55	0,54	0,54	0,57	0,57	0,60	0,65	0,67	0,63	0,54	0,55
Estação_5	0,63	0,65	0,65	0,61	0,63	0,56	0,59	0,62	0,67	0,62	0,58	0,63
Estação_6	0,47	0,51	0,47	0,49	0,49	0,51	0,49	0,52	0,54	0,55	0,53	0,65
Estação_7	0,52	0,54	0,56	0,55	0,56	0,60	0,61	0,61	0,58	0,54	0,54	0,56
Estação_8	0,21	0,19	0,40	0,28	0,17	0,24	0,24	0,20	0,23	0,26	0,19	0,24
Estação_9	0,58	0,57	0,63	0,60	0,61	0,63	0,65	0,67	0,66	0,64	0,66	0,58
Estação_10	0,61	0,54	0,54	0,50	0,55	0,54	0,57	0,57	0,61	0,61	0,57	0,58
Estação_11	0,51	0,51	0,54	0,57	0,55	0,58	0,57	0,62	0,58	0,56	0,54	0,53
Estação_12	0,38	0,37	0,42	0,44	0,42	0,42	0,43	0,43	0,45	0,42	0,37	0,37

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Dentre os inúmeros métodos de estimativa da ETo, o método de Hargreaves-Samani foi utilizado, seguindo a recomendação da FAO, que recomenda seu uso em locais com pouca disponibilidade de dados climáticos, por ser um método baseado em dados de temperaturas máxima e mínima (ALLEN *et al.*, 1998).

A seguir, são apresentadas as estatísticas da disponibilidade espacial das séries de dados.

4.3.2 Disponibilidades Temporais e Espaciais de Séries de Dados

A fim de visualizar a influência direta das séries com falhas no resultado final da ETo, foram plotadas as séries temporais da ETo mensal e do número de dias em cada mês, para ambos os métodos empregados. Para isso, foram calculados o Thiessen através do programa SIGA.

4.3.2.1 Ferramentas Computacionais

Para o cálculo do Thiessen da ETo para todo o Estado do Ceará, foi utilizado o programa SIGA, na versão v1.2.6.0 alpha rev e0de464. Desenvolvido pela Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME), o SIGA³ (Sistema de Informação para o Gerenciamento da Alocação de Água) reúne diversos modelos hidrológicos, para dar suporte ao planejamento e gerenciamento de sistemas hídricos, especialmente no que se refere à alocação de água. Este sistema auxilia no processo de tomada de decisões através da apresentação e análise de alternativas estratégicas de planejamento baseadas nos resultados das simulações, tanto na escala de clima (mensal) quanto na escala de tempo (diária e sub-diária).

O SIGA é um *software* robusto e confiável, que se constitui numa ferramenta de apoio à decisão para a operação de reservatórios nas escalas mensal e diária, subsidiando o processo de alocação de água e a operação de reservatórios de um sistema hídrico, com base em técnicas de simulação e otimização. Mais adiante, será mostrado o passo a passo do cálculo da ETo no Estado do Ceará realizado utilizando-se o SIGA.

4.3.2.2 Polígono de Thiessen

Segundo Villela (1975), o método de Thiessen se caracteriza pela atribuição de pesos relativos aos postos considerados mais representativos para uma área específica da bacia hidrográfica, sem considerar influências orográficas (ANDRADE, 2011).

O método de Thiessen consiste em calcular médias através de polígonos, onde um

³ O programa SIGA está disponível em <<http://www3.funceme.br/siga/>>.

fator de peso é atribuído a uma variável (x) para cada polígono gerado, proporcionais à área de influência de cada um (Figura 7).

O peso de cada área é determinado em mapas da região de interesse (Bacias Hidrográficas, Estados, Sub-bacias, Municípios etc.), que contém as estações de medição da variável (x) ou seus pontos representativos, unindo-se as estações adjacentes por linhas retas e, em seguida, traçando-se as mediatrizes destas retas formando os polígonos.

Os lados dos polígonos são os limites das áreas de influência (A_i) de cada estação. A variável média (x_{med}) é calculada pela média ponderada entre a precipitação (x_i) de cada estação e o peso a ela atribuído (A_i), que é a área de influência de (x_i), conforme mostra a Equação 1:

$$x_{med} = \frac{\sum x_i A_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

Em que:

x_{med} = representa a ETo média para o Estado do Ceará;

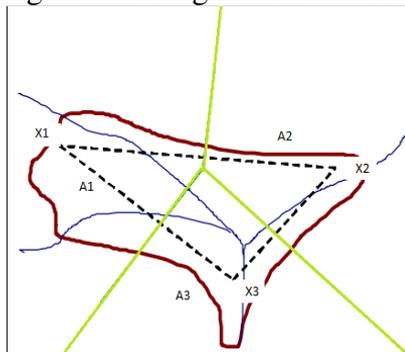
x_i = representa as estações ($i = 1, 2, \dots, 12$);

A_i = representa a área de influência de cada estação ($i = 1, 2, \dots, 12$); e

$\sum A_i$ = representa a área total (km).

Especialmente, o polígono de Thiessen, pode ser representado como mostra a Figura 7:

Figura 7 – Polígono de Thiessen.



Fonte: Adaptado de Andrade (2011).

4.3.2.3 Cálculo da ETo mensal com série de dados acima de 15 dias

Para obtenção do acumulado mensal da ETo, foi necessário considerar apenas os meses que continham um número de dias superiores a 15, uma vez que, como esse número de

dias foi possível calcular a ETo acumulada em cada mês do ano, conforme utilização da Equação 2 e Equação 3. Para a obtenção do acumulado mensal da ETo, seguiu-se o roteiro descrito adiante:

Passo 1: Extraíu-se a média equivalente a quantidade de dias k ($k \geq 15$ dias) para cada ano (i) e mês (j) (Equação 2).

$$\bar{X}_{i,j} = \frac{\sum_{k=15}^n E_{(i,j,k)}}{n} \quad (2)$$

Em que:

$i = (1976, 1977, \dots, 2005)$;

$j = (\text{Janeiro, Fevereiro, } \dots, \text{Dezembro})$;

$K =$ quantidade de dias com registros da variável ETo;

$n =$ número de dias superiores ou iguais a 15, ou seja, ($n \geq 15$ dias); e

$E =$ variável ETo.

Passo 2: Acumulado mensal da ETo ($acum_{i,j}$), para cada ano (i) e mês (j) (Equação 3).

$$acum_{i,j} = \bar{X}_{i,j} * N_{i,j} \quad (3)$$

Em que:

$N_{i,j} =$ número total de dias para cada ano (i) e mês (j);

4.3.3 *Análise de Tendências Temporais*

4.3.3.1 *Teste de hipótese de inclinação da regressão*

Considera-se uma hipótese como sendo uma afirmação sobre uma população, e não sobre uma amostra desta. Para que estas análises em relação a essa afirmação ocorram, normalmente são formuladas a Hipótese Nula (H_0) e Hipótese Alternativa (H_1).

O procedimento do teste de hipóteses consiste em quatro etapas: (I) indicar as hipóteses; (II) formular um plano de análise; (III) analisar os dados da amostra; e (IV) interpretar os resultados. As hipóteses adotadas, são:

$$H_0: B_1 = 0 \text{ (I)}$$

$$H_1: B_1 \neq 0 \text{ (II)}$$

Para o caso (I), a hipótese nula afirma que o declive da linha de regressão é igual a zero, e a hipótese alternativa (II), que o declive da linha de regressão é diferente de zero (ver Figura 8).

Definida as hipóteses, o teste baseia-se na condução das mesmas para determinar se existe uma relação linear significativa entre uma variável independente X e uma variável dependente Y . O teste é centrado na inclinação da reta (linha) de regressão, que pode ser definida como mostra a Equação 4:

$$Y = B_0 + B_1x \quad (4)$$

Em que:

B_0 = constante (ponto de intercepção do eixo das ordenadas);

B_1 = inclinação (coeficiente de regressão ou coeficiente angular da reta);

x = valor da variável independente; e

Y é o valor da variável dependente.

Se constatado que a inclinação da linha de regressão é significativamente diferente de zero, ou seja, $B_1 \neq 0$, conclui-se que existe uma relação linear significativa entre a variável independente x e a variável dependente \hat{Y} .

O cálculo do desvio-padrão residual (Sy/x) da reta de regressão, ou Erro padrão de estimativa, tal como descrito no Guia RELACRE13 (2000), é dado pela Equação 5:

$$Sy/x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [y_i - (B_0 + B_1x_i)]^2}{N - 2}} \quad (5)$$

Em que:

Sy/x = desvio-padrão residual;

y_i = valor da variável dependente para a observação i ; e

O desvio-padrão de declive, S_b , é dado pela Equação 6:

$$S_b = \frac{S_{y/x}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (6)$$

Em que:

x_i = valor observado da variável independente para observação i ; e

\bar{x} = média da variável independente, e o símbolo n representa o número de observações.

Para a regressão linear simples (uma variável independente e outra dependente), os graus de liberdade (GL) são obtidos por meio da Equação 7:

$$GL = N - 2 \quad (7)$$

Em que:

N = Número de observações na amostra.

A estatística do teste é a estatística (t), definida pela Equação 8:

$$t = B_1 / S_b \quad (8)$$

Em que:

B_1 = declive da linha de regressão da amostra;

S_b é o desvio-padrão de declive ou erro padrão da inclinação.

A ideia principal da análise do teste está baseada na afirmação de rejeitar ou não rejeitar a hipótese nula. Com isso, é necessário verificar se existem argumentos estatisticamente suficientes para rejeitar a hipótese nula (H_0).

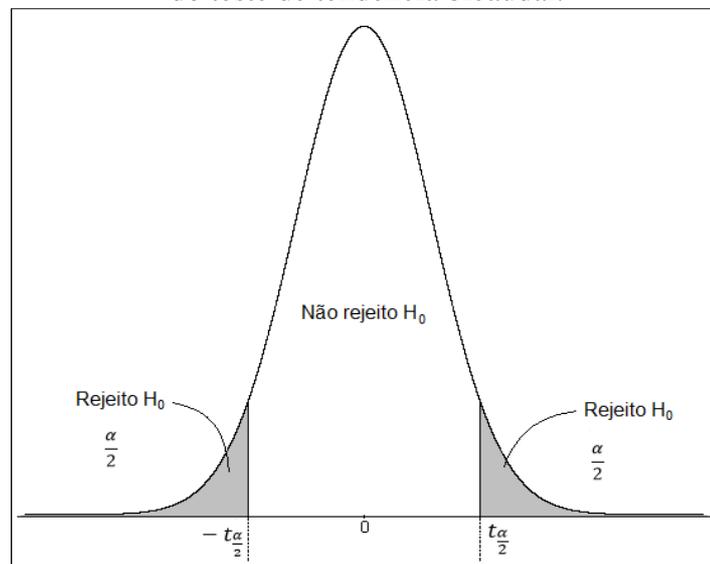
Se o teste “Rejeita H_0 ”, o resultado torna-se significativo – a série apresenta tendência significativa. Se “Não rejeita H_0 ”, o resultado torna-se não-significativo, e a série não apresenta tendência significativa.

Para que a (H_0) seja rejeitada, o resultado do teste tem de permanecer de acima de um intervalo de significância, melhor dizendo, acima dos valores críticos, conforme mostrado na Figura 8. Assim, quando o resultado do teste se posicionar acima dos valores críticos, pode-se concluir que há evidências estatísticas suficientes para rejeitar a hipótese nula. Com isso, o teste aponta que a inclinação da reta apresenta tendência significativa.

A literatura relata que os níveis de significância mais comuns de escolha são: ($\alpha = 0,01$ ou $\alpha = 1\%$), e ($\alpha = 0,05$ ou $\alpha = 5\%$). Quando não se rejeita (H_0), os resultados não apresentam tendência, ou seja: comportam-se dentro da normalidade, ou do intervalo de confiança de 95%, características de uma distribuição normal, como mostrado na Figura 8. Nesse trabalho, foi adotado um nível de $\alpha = 0,05$ ou $\alpha = 5\%$.

Os testes não-paramétricos podem ser aplicados a uma ampla diversidade de situações, porque não exigem populações distribuídas normalmente.

Figura 8 – Limites da distribuição t de student, mostrando os valores críticos para a validação do teste de tendência bicaudal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como foi adotado o nível de significância de $\alpha = 5\%$, uma forma de verificar se o valor encontrado apresenta significância estatística é através da determinação do *P-valor* (p), com base na estatística de teste t , e nos graus de liberdade (GL), onde o valor P é a probabilidade de que a estatística do teste tenha valor extremo em relação ao valor observado quando a hipótese nula (H_0) é verdadeira.

Também pode-se interpretar o *P-valor* como o menor valor do nível de significância para o qual rejeitamos (H_0). Desta forma, se o nível de significância (α) proposto para o teste for menor que o *P-valor* não rejeitamos a hipótese (H_0). O valor de (p) é calculado pela Distribuição de t de student.

Logo após a obtenção do teste t , é preciso calcular também os valores críticos. Os valores críticos da estatística podem ser obtidos da tabela de distribuição t de student (Tabela T de student Apêndice C), considerando $\alpha = 5\%$ e os respectivos graus de liberdade. Outra

alternativa seria o cálculo da INVERSA da Distribuição t de student.

4.3.3.2 *Teste de Mann-Kendall*

Para a avaliação da tendência climática nas séries de temperatura máxima, média, mínima, umidade relativa do ar, vento e ETo, foi utilizado o teste de tendência de Mann-Kendall (MK), proposto inicialmente por Sneyers (1975), e para estimar a magnitude das tendências encontradas nas séries, foi utilizado método de Declividade ou Curvatura de Sen proposto por Sen (1968). Goossens e Berger (1986) afirmam que o teste de Mann-Kendall é o método mais apropriado para analisar mudanças climáticas em séries climatológicas.

Este teste tem sido bastante empregado para verificar tendências em séries pluviiais, com intuito de analisar mudanças climáticas. O teste de Mann-Kendall consiste em comparar cada valor da série temporal com os valores restantes, sempre em ordem sequencial. De maneira resumida, a estatística do teste pode ser entendida, como, a contagem do número de vezes que, os termos restantes são maiores, do que o valor analisado.

O teste não paramétrico de Mann-Kendall (MK) é amplamente utilizado para a identificação de tendências em séries de observações hidrológicas. De acordo com Portela *et al.* (2011), o referido teste é relatado por inúmeros autores, que evidenciam resultados bastante consistentes e consiste da seguinte formulação:

Considerando uma série temporal de N valores anuais ou semestrais (um valor por ano ou por semestre) com termo genérico Y_i , $i = 1, \dots, N$. De acordo com o teste de Mann-Kendall, cada valor Y_i , $i = 1, \dots, N - 1$ é comparado com todos os valores que se lhe seguem Y_j , $j = i + 1, i + 2, \dots, N$, gerando-se uma nova série W_i que contém um indicador do valor relativo da diferença entre termos da série Y_i , de acordo com a Equação 9:

$$W_i = \text{signal}(Y_i - Y_j) = \begin{cases} +1 & \text{se } Y_i > Y_j \\ 0 & \text{se } Y_i = Y_j \\ -1 & \text{se } Y_i < Y_j \end{cases} \quad (9)$$

A estatística (S) do teste de MK é obtida através da soma da série W_i , da seguinte forma:

$$S = \sum_i^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{signal}(Y_i - Y_j) \quad (10)$$

Os autores Mann (1945), e Kendall (1975), demonstraram que, para amostras com grande dimensão em que a estatística do teste ocorre sem a presença de valores nulos de W_i , e considerando a hipótese nula, H_0 , de ausência de tendência, a estatística S segue aproximadamente uma distribuição normal com média nula, ou seja:

$$E(S) = 0 \quad (11)$$

A variância é, então, definida como mostra a Equação 12, onde N é a dimensão da amostra:

$$VAR(S) = \frac{N(N-1)(2N+15)}{18} \quad (12)$$

A significância de S para a hipótese nula pode ser testada com recurso a um teste bilateral, sendo que pode ser rejeitada para grandes valores da estatística $Z(t)$ definida de acordo com:

$$Z(t) = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & se\ S > 0 \\ 0 & se\ S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} & se\ S < 0 \end{cases} \quad (13)$$

A hipótese nula de ausência de tendência, H_0 , é rejeitada sempre que $|Z(t)| > Z_{\alpha/2}$: em que é o nível de significância adotado e $Z_{\alpha/2}$ é a variável normal reduzida para a função de distribuição normal padrão, na cauda direita da distribuição. O sinal da estatística $Z(t)$ indica se a tendência é crescente ($Z(t)>0$) ou decrescente ($Z(t)<0$). Nas aplicações efetuadas no âmbito do trabalho, adotou-se o nível de significância de $\alpha = 0,05$.

4.3.3.3 Estimador de declive de Sen ou Curvatura de Sen

Como o teste de tendência de MK não fornece a magnitude das tendências detectadas, para tal foi necessário aplicar um estimador estatístico da tendência, no entanto foi utilizado estimador de declive ou Curvatura de Sen proposto por Sen (1968), conforme descrito por Portela *et al.* (2011) e Tao *et al.* (2014), sendo estimado através da estatística *Sen* dada por:

$$Sen = \frac{X_j - X_i}{J - I} \text{ com } i < j \quad (14)$$

onde X_i e X_j representam os valores da variável em estudo na escala de tempo (anual e semestral) I e J . Assim, o valor positivo ou negativo para Sen indica tendência crescente ou decrescente, respectivamente. Se há n valores na série analisada, então o número de pares estimados de Sen é dado por $N = n(n - 1)/2$. O estimador de declive de Sen é a mediana dos N valores de Sen . No entanto, a Equação 14 pode ser reescrita como:

$$Sen = \text{mediana} \left(\frac{X_j - X_i}{J - I} \right) \text{ para todo } i < j < n \quad (15)$$

4.4 Teste de Hipótese para comparação de duas médias com variâncias conhecidas

A seguir serão apresentados os testes para comparação entre as médias de duas populações independentes. Esse teste é conhecido como *Teste z*, indicado quando a média e variância populacional são conhecidos.

$$\text{Hipóteses: } \begin{cases} H_0: \mu_1 = \mu_2 \\ H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \end{cases}$$

Em que:

μ_1 = Média da variável populacional (1); e

μ_2 é a média da variável populacional (2).

No caso em que as variâncias são conhecidas, a estatística teste z é dada por (NAGHETTINI & PINTO, 2007):

$$Z = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \sim N(0,1) \quad (16)$$

Em que:

σ_1^2 = Variância populacional (1);

σ_2^2 = Variância populacional (2);

n_1 = Tamanho da amostra (1);

n_2 = Tamanho da amostra (2);

\bar{X}_1 = Média de variável independente (1); e

\bar{X}_2 = Média da variável independente (2);

Como estamos testando a igualdade das médias, então, sob a hipótese nula a diferença ($\mu_1 - \mu_2$) é igual a zero, ou seja, $\mu_1 - \mu_2 = 0$. Assim sendo, a **estatística teste** se resume a:

$$Z = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (17)$$

Logo, o Valor Observado:

$$Z_0 = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (18)$$

Se:

- $Z_0 < Z_{\alpha/2}$ ou $Z_0 > Z_{1-\alpha/2} \Rightarrow$ Rejeita-se H_0 ;
- $Z_{\alpha/2} \leq Z_0 \leq Z_{1-\alpha/2} \Rightarrow$ Não se Rejeita H_0 ;

O teste foi aplicado ao nível de significância de 5%, ou seja, $\alpha = 0,05$.

No entanto, uma vez definida a **estatística teste** e calculado o seu **valor observado**, a regra de decisão não muda, dependendo apenas da *distribuição de probabilidade associada*. O Valor **p** é o menor nível de significância que conduz à rejeição da hipótese nula H_0 , com os dados fornecidos.

O valor **p** do teste é calculado pela expressão:

$$p = 2P(Z > |Z_0|) \quad (19)$$

Se:

- $p < \alpha \Rightarrow$ Rejeita-se H_0 ;

- $p \geq \alpha \Rightarrow$ Não se Rejeita H_0 ;

4.5 Estimativa de Evapotranspiração Potencial

4.5.1 Método Penman-Monteith FAO56

Este é um método micrometeorológico, descrito por Monteith (1965), que foi adaptado por Allen *et al.* (1989) para a estimativa da evapotranspiração potencial ETo na escala diária. Dentre os métodos indiretos, o PM_FAO56 é considerado internacionalmente como o mais apropriado para a estimativa da ETo, sendo adotado como padrão pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO).

Para Carvalho *et al.* (2011), este método representa, de maneira consistente, o fenômeno biofísico da evapotranspiração, pois é alimentado por quase todos os elementos meteorológicos observados em estações meteorológicas de superfície. Atualmente, este é o método padrão da FAO56 (ALLEN *et al.*, 1998), obtido através de diversas parametrizações, sendo ETo (mm/dia) dada pela Equação 20:

$$ET_{o_{PM}} = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{(T_{med} + 273)} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (20)$$

Em que:

$ET_{o_{PM}}$ = Evapotranspiração potencial (mm.dia-1);

Rn = Radiação líquida total do gramado (MJ.m-2.dia-1);

G = Densidade do fluxo de calor no solo (MJ.m-2.dia-1);

T_{med} - Temperatura média diária do ar a 2 m de altura (°C);

γ - Constante psicrométrica (KPa°C-1);

U_2 - Velocidade do vento média diária a 2 m de altura (m.s-1);

e_s - Pressão de saturação de vapor médio diário (kPa);

e_a - Pressão de vapor médio diário (kPa);

$(e_s - e_a)$ - Déficit de saturação de vapor médio diário (kPa); e

Δ - Declividade da curva de pressão de vapor no ponto de T (kPa.°C-1).

4.5.1.1 Parâmetros e variáveis

4.5.1.1.1 Velocidade média do vento (U_2)

O problema da ausência de dados de velocidade do vento pode ser solucionado de duas maneiras:

- a) Quando não se dispõe de dados de velocidade do vento (u_2) registrados, recomenda-se utilizar a u_2 média de 2m/s, conforme descrito por Allen *et al.* (1998), em função desse número ser uma média de 2.000 estações meteorológicas ao redor do globo; e
- b) Quando dados de velocidade do vento não estão disponíveis, também é recomendada a utilização de dados observados em um local próximo, dentro da mesma região homogênea, de preferência levando em consideração a variabilidade sazonal do vento (ALLEN *et al.*, 1998).

Constante Psicrométrica (γ)

A constante psicrométrica γ adotada neste trabalho foi $\gamma = 0,063$ (KPa°C⁻¹).

Fluxo de calor no solo (G)

Para o fluxo de calor no solo (G), foi considerado ($G_{\text{dia}} \cong 0$), conforme recomenda a FAO56. Para períodos diários, o fluxo de calor no solo é considerado relativamente pequeno, pois a variação diária deste fluxo de calor no solo é ínfima, podendo, por isso, ser considerada equivalente a zero ($G_{\text{dia}} \cong 0$).

Declividade da Curva de Pressão de Saturação de Vapor (Δ)

A declividade da curva de pressão de saturação de vapor (Δ) é dada pela Equação 21 e sua unidade é [KPa.°C⁻¹].

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(T_{med} + 273,3)^2} \quad (21)$$

Em que:

T_{med} = Temperatura média (°C); e

e_s = Pressão de saturação de vapor médio diário (kPa).

Pressão de Saturação de Vapor Médio Diário (e_s)

A Pressão de saturação de vapor médio diário é dada, em kPa, pela expressão mostrada na Equação 22:

$$e_s = \left[\frac{e^0(Tmáx) + e^0(Tmín)}{2} \right] \quad (22)$$

Em que:

$e^0(Tmáx)$ = pressão de saturação de vapor a temperatura máxima (kPa); e

$e^0(Tmín)$ = pressão de saturação de vapor a temperatura mínima (kPa).

Pressão de Saturação de Vapor a Temperatura Máxima ($e^0(Tmáx)$)

A pressão de saturação de vapor a temperatura máxima ($e^0(Tmáx)$) é expressa em kPa, e dada pela Equação 23:

$$e^0(Tmáx) = 0,6108 \cdot \exp \left[\frac{17,27(Tmáx)}{(Tmáx) + 237,3} \right] \quad (23)$$

Em que:

$Tmáx$ = Temperatura máxima (°C).

Pressão de Saturação de Vapor a Temperatura Mínima ($e^0(Tmín)$)

A pressão de saturação de vapor a temperatura mínima ($e^0(Tmín)$) é expressa em kPa, e dada pela Equação 24:

$$e^0(Tmín) = 0,6108. \exp \left[\frac{17,27(Tmín)}{(Tmín) + 237,3} \right] \quad (24)$$

Em que:

$e^0(Tmín)$ = pressão de saturação de vapor a temperatura máxima (kPa); e

$Tmín$ = Temperatura mínima (°C).

Quando os dados de umidade relativa do ar estão faltando, o déficit de pressão de vapor pode ser estimado com base em dados de temperatura do ar. A pressão real de vapor é obtida, assumindo que a temperatura do ponto de orvalho (T_w) seja próxima da temperatura mínima diária ($Tmín$), o que geralmente é observado no início da manhã nas estações meteorológicas de referência (ALLEN *et al.*, 1998; JABLON & SAHLI, 2008).

Para regiões semiáridas, recomenda-se retirar de 2 a 3°C da temperatura mínima aferida, para que se aproxime da temperatura do ponto de orvalho, por ser uma região bastante seca, que apresenta baixa umidade (ALLEN *et al.*, 1998). Neste trabalho, no entanto, essa recomendação não foi adotada. Antes, foi adotado que (T_w) \cong ($Tmín$).

4.5.1.1.2 Saldo de radiação (Rn)

O saldo de radiação (Rn) é dado pela Equação 25:

$$Rn = Rns - Rnl \quad (25)$$

Em que:

Rns = Saldo de radiação de ondas curtas; e

Rnl = Saldo de radiação de ondas longas.

4.5.1.1.3 Saldo de radiação de ondas curtas (Rns)

O saldo de radiação de ondas curtas (Rns) é dado pela Equação 26:

$$Rns = (1 - \alpha)Rs \quad (26)$$

Em que:

α = Albedo da cultura em questão.

Neste trabalho, foi adotado um albedo $\alpha = 0,23$, valor recomendado pela FAO para uma cultura de referência.

4.5.1.1.4 Radiação solar global (R_s)

A radiação solar global (R_s) é dada em [$\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$], conforme a Equação 27.

$$R_s = K_r \sqrt{(T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}) R_a} \quad (27)$$

Em que:

K_r = Coeficiente de ajuste;

R_a = Radiação no topo da atmosfera ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

$T_{\text{máx}}$ = Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$); e

$T_{\text{mín}}$ = Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$).

A FAO56 recomenda usar um valor de 0,16 para regiões no interior do continente, e 0,19 para áreas próximas a grandes massas de água. No entanto, para o presente estudo, foi adotado um K_r de 0,16.

4.5.1.1.5 Saldo de radiação de ondas longas R_{nl}

O saldo de radiação de ondas longas (R_{nl}) é dado pela Equação 28:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{(T_{\text{máx}})^{\circ K^4} + (T_{\text{mín}})^{\circ K^4}}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (28)$$

Em que:

σ = constante de Stefan-Boltzman $4,903 \times 10^{-9}$ ($\text{MJ.k}^{-4}\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$);

e_a = pressão parcial de vapor (KPa);

R_s = Radiação solar global ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

R_{so} = Radiação solar em dias de céu claro ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$);

$(T_{\text{máx}})^{\circ K}$ = temperatura máxima em Kelvin; e

$(T_{mín})^{\circ}K$ = temperatura mínima em Kelvin.

4.5.1.1.6 Radiação solar em dias de céu claro

A radiação solar em dias de céu claro (R_{so}) é dada pela seguinte expressão (Equação 29):

$$R_{so} = (a_s + b_s)R_a \quad (29)$$

Em que:

$a_s + b_s$ = fração da radiação extraterrestre em dias de céu claro ($n=N$).

Quando não dispõe dos valores de a_s e b_s , consideram os mesmos como sendo 0,25 e 0,50 respectivamente.

4.5.1.1.7 Radiação solar no topo da atmosfera

A radiação solar no topo da atmosfera (R_a) é dada, em $[MJ.m^{-2}.d^{-1}]$, pela Equação 30:

$$R_a = 37,6d_r W_s [\text{sen}(\varphi)\text{sen}(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\text{sen}(W_s)] \quad (30)$$

Em que:

W_s = O ângulo horário ao pôr do sol;

δ = Declinação solar; e

φ = Latitude.

4.5.1.1.8 Distância relativa Terra-Sol

A distância relativa Terra-Sol (d_r) é dada pela Equação 31:

$$d_r = 1 + 0,033\text{sen}\left(\frac{2\pi J}{365}\right) \quad (31)$$

Em que:

J = dia juliano; e

$\pi = 3,14$.

4.5.1.1.9 Declinação solar (δ)

A declinação solar (δ) é dada, em radianos, conforme a Equação 32:

$$\delta = 0,409 \text{sen} \left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39 \right) \quad (32)$$

4.5.1.1.10 Ângulo horário ao pôr do sol

O ângulo horário ao pôr do sol (Ws) é dado, em radianos, conforme a Equação 33:

$$Ws = \arccos[-\text{tg}(\varphi)\text{tg}(\delta)] \quad (33)$$

4.5.1.1.11 Pressão parcial de vapor

A pressão parcial de vapor (e_a) é dada, em kPa, conforme a Equação 34:

$$e_a = e_s \frac{UR}{100} \quad (34)$$

4.5.1.1.12 Umidade relativa do ar (UR)

As séries de dados de vento dos MCGs estão disponíveis a uma altura de 10m. Uma vez que os dados de vento devem ser coletados a uma altura de 2m – altura padrão para o cálculo pelo método PM_FAO56 –, foi preciso então utilizar a formulação a seguir (Equação 35) para transformar os dados da velocidade do vento de 10 m para 2 m (ALLEN *et al.*, 1998).

$$U_2 = U_z \frac{4,97}{\ln(67,8 * Z - 5,42)} \quad (35)$$

Em que:

U_z = velocidade do vento obtida pelos modelos MCGs; e

Z = altura em que foi coletado o dado (em nosso caso, 10 metros).

4.5.2 Método Penman-Monteith FAO56 com velocidade do vento constante ($v=2m/s$)

Esse método segue metodologia semelhante à do método de Penman-Monteith FAO56, porém com uma alteração na variável referente à velocidade do vento, pois, em vez de variar conforme os dados reais de cada região, ela é mantida com velocidade constante de 2m/s.

4.5.3 Método de Hargreaves-Samani (1985)

Este método foi proposto a partir de dados de lisímetros obtidos na Califórnia, Estados Unidos, em clima semiárido, portanto (PEREIRA *et al.*, 1997). Hargreaves-Samani propuseram a seguinte expressão para a estimativa da ETo (Equação 36):

$$ET_{O_{HG}} = 0,0023(T_{med} + 17,8) * \sqrt{(T_{máx} - T_{mín})} R_a * 0,408 \quad (36)$$

Em que:

$ET_{O_{HG}}$ = Evapotranspiração potencial obtida pelo método de Hargreaves-Samani (mm/dia);

T_{med} = temperatura média do ar (°C);

$T_{máx}$ = temperatura máxima do ar (°C);

$T_{mín}$ = temperatura mínima do ar (°C); e

R_a = radiação solar no topo da atmosfera (mm/dia).

Na referida Equação, o valor 0,408 corresponde ao fator de conversão de MJ.m⁻².d⁻¹ para mm/dia.

4.6 Correção de Viés e Variância dos Dados Provenientes dos Modelos do CMIP5

4.6.1 Função Densidade

Segundo a literatura, a distribuição gama é uma distribuição probabilística muito utilizada para a representação de variáveis hidrológicas que apresentam versatilidade de formas e coeficientes de assimetria. Todavia, essa distribuição será utilizada para evitar um possível comportamento tendencioso (viés) dos dados oriundos dos Modelos de Circulação Global. A distribuição gama possui formulação conforme descrita adiante.

A função densidade de probabilidade gama, será utilizada para a obtenção da

probabilidade e, conseqüentemente, das funções de distribuição cumulativa (CDFs).

Função densidade de probabilidade Gama

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (37)$$

Com $\beta > 0$, $\alpha > 0$ e $x > 0$, onde $\Gamma(\alpha)$ é função gama do parâmetro (α), dado por:

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx, \text{ para todo } x > 0 \quad (38)$$

Outra forma de se obter o valor de $\Gamma(x)$ é através da Distribuição Gama aproximada, citada por Assis *et al.* (1996), descrita como segue abaixo.

$$\Gamma(x) = \sqrt{\frac{2\pi}{x}} e^{x[\ln(x) - f(x)]} \quad (39)$$

onde:

$$f(x) = 1 - \frac{1}{12x^2} + \frac{1}{360x^4} - \frac{1}{1260x^6} \quad (40)$$

Para a estimativa dos parâmetros de forma (α) e de posição (β), foi utilizado o Método dos Momentos e da Máxima Verossimilhança, segundo ensinam Assis *et al.* (1996), dados conforme descrito abaixo.

4.6.1.1 Método dos Momentos

$$\bar{X} = \alpha\beta \rightarrow \alpha = \frac{\bar{X}}{\beta} \quad (41)$$

$$S^2 = \alpha\beta^2 \rightarrow \beta = \frac{S^2}{\bar{X}} \quad (42)$$

Em que:

\bar{X} = média aritmética das observações (dados observados e/ou modelados); e

S^2 = variância das observações (dados observados e/ou modelados).

4.6.1.2 Método da Máxima Verossimilhança

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad \therefore \quad A = \ln \bar{X} - X_g \quad (43)$$

$$\beta = \frac{\bar{X}}{\alpha} \quad (44)$$

Em que:

\bar{X} = média aritmética das observações (dados observados e/ou modelados); e

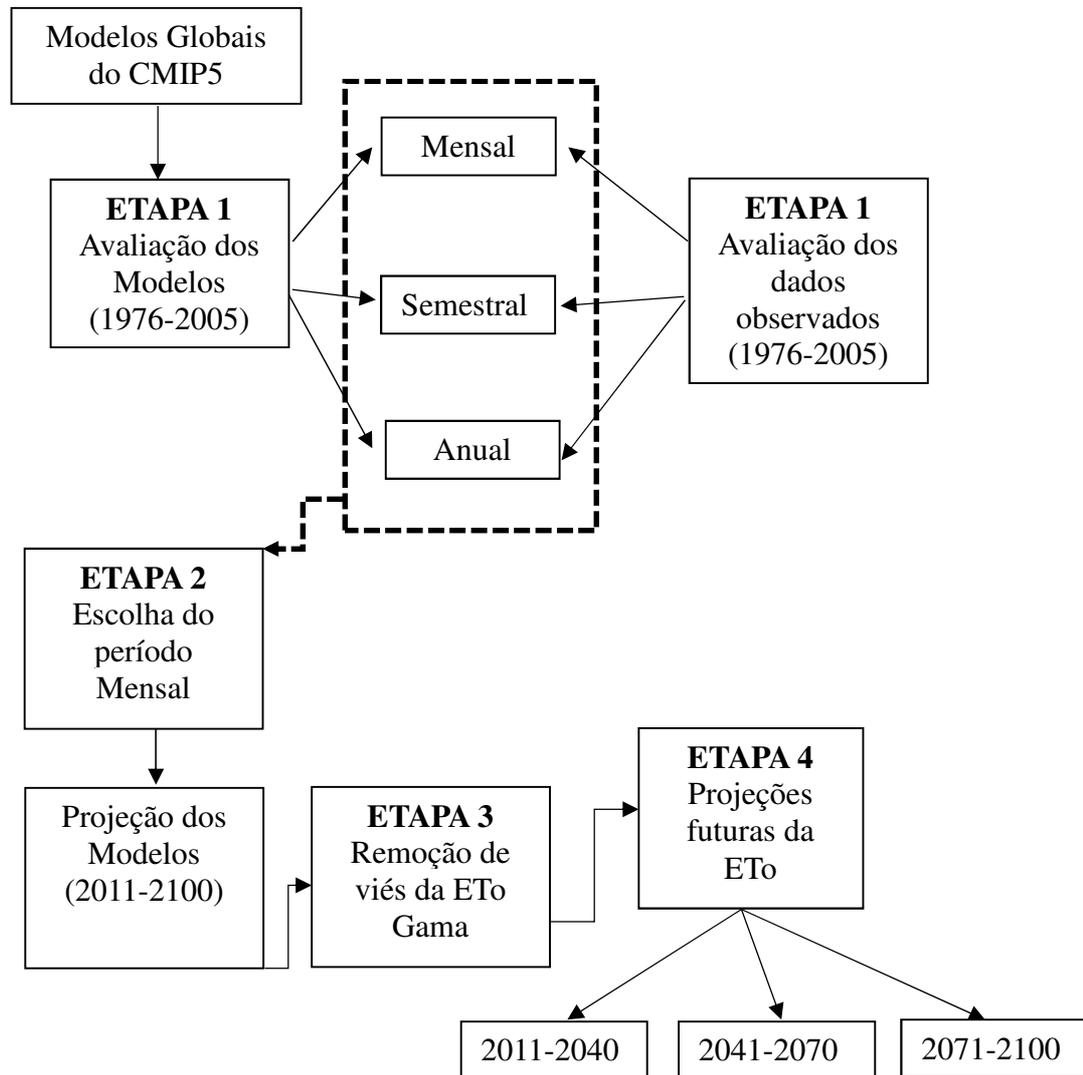
X_g = média geométrica das observações (dados observados e/ou modelados).

Os parâmetros de forma (α) e de escala (β) foram estimados pelos dois métodos citados acima, porém, quando comparados seus resultados aplicados na Distribuição Gama, a ETo média corrigida praticamente não apresentou variação entre um e outro. Portanto, para continuação da análise, foram escolhidos apenas os resultados dos parâmetros de forma (α) e de posição (β) pelo Método dos Momentos.

Após realizados todos os cálculos envolvendo a ETo, o passo seguinte consiste na análise dos resultados, a nível mensal, semestral e anual, começando pelo período histórico, e, em sequência, as projeções futuras (ver esquema da Figura 9).

Na sequência, será mostrado o esquema de correção pela aplicação da distribuição Gama, para as variáveis ETo e precipitação.

Figura 9 – Síntese da metodologia utilizada no trabalho, para a obtenção das projeções futuras da ETo e precipitação.

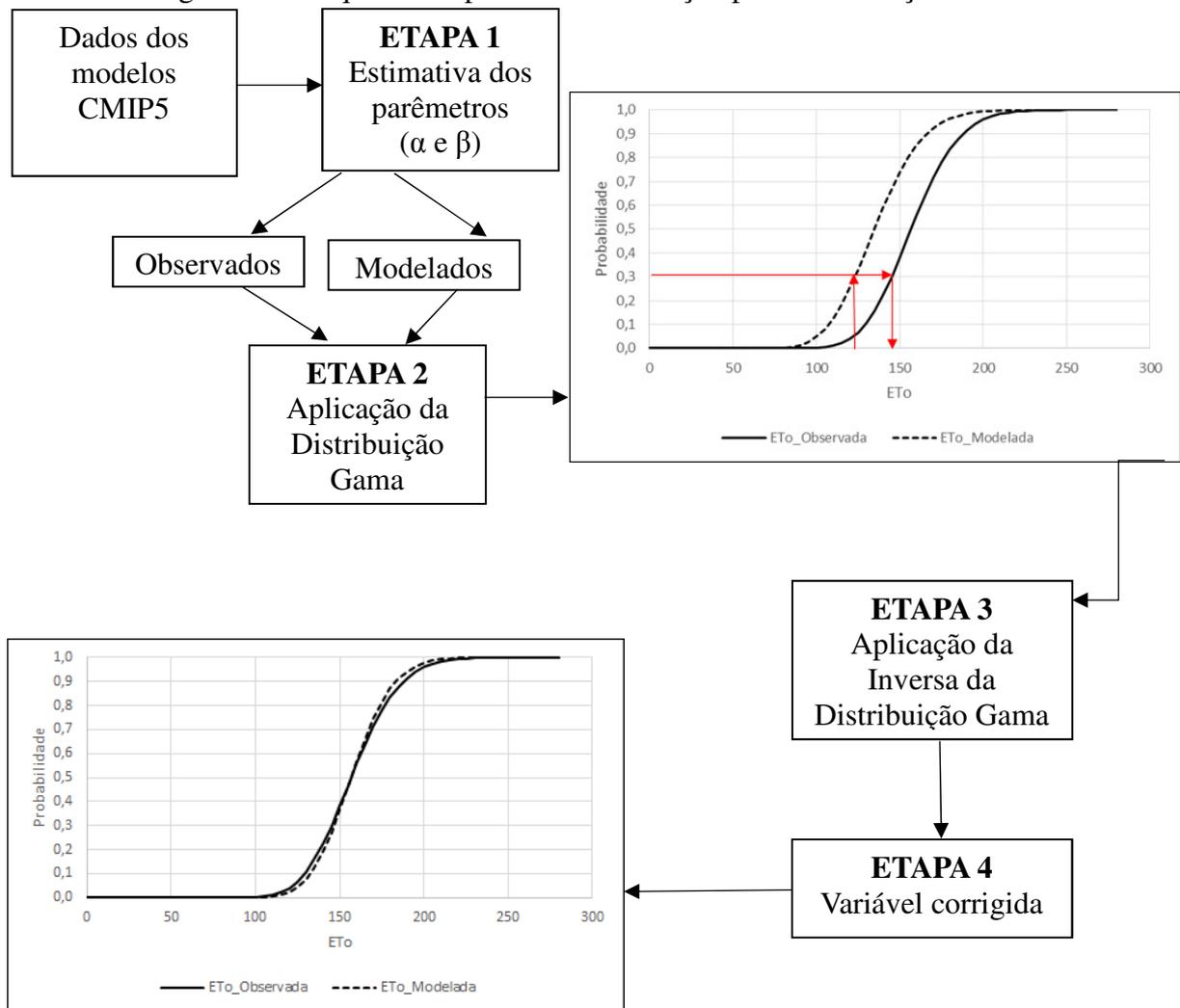


Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.6.2 Correção a partir da Média e Variância

Para a execução da correção Gama foi necessária a utilização de um ajuste do viés, em função dos dados observados, realizado da seguinte forma: a correção Gama foi aplicada para dados de evapotranspiração e precipitação dos modelos do CMIP5, no período histórico (clima presente) de 1976-2005. A Figura 10 descreve o processo de correção e a relação entre a probabilidade acumulada e a evapotranspiração ou precipitação.

Figura 10 – Esquema do processo de correção pela Distribuição Gama.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Assim, para a elaboração do mapeamento da probabilidade para correção do viés da ETo mensal, foi preciso fundamentar duas funções de distribuição cumulativa (CDFs), sendo uma a função obtida por meio de dados modelados e a outra, por meio de dados observados.

Cada CDF criada encaixava-se com uma distribuição gama, salvando-se os parâmetros de forma e escala. O objetivo principal era verificar a probabilidade de os Modelos do CMIP5 enxergarem os dados observados.

A etapa segunda consistia em conferir o compartimento probabilístico dos dados modelados em relação aos observados. A aplicação da correção tinha como objetivo a aproximação máxima possível entre dados modelados e dados observados, resultando na correção final, como ilustrado na Figura 10, na caixa "ETAPA 4". A correção foi aplicada na ETo estimada pelos três métodos empíricos: Penman-Monteith FAO56, Hargreaves-Samani e Penman-Monteith FAO56, adotando-se velocidade do vento constante de 2m/s.

Os modelos climáticos têm grande dificuldade de representarem a variabilidade real das variáveis observadas. Essa baixa representatividade compromete o resultado da ETo. Pensando nisto, procurou-se estabelecer uma relação entre a ETo estimada (com dados observados) pelo método de Penman-Monteith FAO56 (sendo este o melhor representante do processo de ETo) com o método de Hargreaves-Samani, a fim de obter a melhor relação entre os métodos, para a correção da estimativa de Hargreaves-Samani a partir dos modelos climáticos.

4.7 Relação entre Hargreaves-Samani e Penman-Monteith para fins de correção das estimativas de Hargreaves-Samani, a partir de Modelos Climáticos

4.7.1 O Modelo de Regressão

No intuito de verificar a correlação entre a ETo estimada por Hargreaves-Samani e a ETo estimada por Penman-Monteith FAO56, foi necessário aplicar um modelo de regressão linear, que permitiu a visualização da equação da reta de regressão em diversos períodos, conforme mostrado nas Figura 11, Figura 12 e Figura 13.

Para afirmar o elevado grau de correlação entre os diferentes períodos, e detectar o menor grau de incerteza dos métodos aplicados, foi indispensável a aplicação da Variância Média de Predição (VMP). Logo, quanto menor o valor encontrado, melhor a relação entre os dois métodos, e menor a incerteza na estimativa da ETo.

Abaixo, é apresentada a metodologia de cálculo da VMP, inicialmente através da equação da reta de regressão, em sua forma básica, e em seguida, na forma matricial.

4.7.2 Equação de regressão

$$y = bx + a + \varepsilon \quad (45)$$

Em que:

ε é um vetor de erros.

Considera-se que ε possui distribuição normal, com média 0 e variância σ^2 . Logo:

$$\varepsilon \cong 0 \quad (46)$$

Então, a equação da reta pode ser resumida a:

$$Y = bX + a \quad (47)$$

Devido à análise envolver várias equações, a forma matricial pode ser representada, como:

$$Y_i = (y_1, y_2, \dots, y_n), X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ 1 & x_3 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_n \end{bmatrix} \text{ e as constantes } \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \text{ sendo } i = (1, 2, \dots, n), \quad (48)$$

Sendo assim,

$$Y_i = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ 1 & x_3 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_n \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (49)$$

No presente trabalho, serão realizadas regressões que relacionam as estimativas da ETo obtidas pelo método de Hargreaves-Samani H_(OBS) e pelo método de Penman-Monteith FAO56 P_(OBS). As técnicas de regressão serão aplicadas para verificar o grau de correlação e/ou relação linear entre H_(OBS) e P_(OBS), em diferentes períodos ao longo do ano.

Para tanto, a equação da regressão pode ser reescrita da seguinte forma:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (50)$$

Na Equação 50, $Y = ETo_{Pen}$ é um vetor com os valores da ETo, calculada com o método de Penman-Montieth FAO 56 para cada mês.

$$\hat{Y}_i = (y_{11}, y_{21}, \dots, y_{n1}), X_i = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} \\ 1 & X_{21} \\ 1 & X_{31} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & X_{n1} \end{bmatrix} \quad (51)$$

Na Equação 50, $X = ETo_{Har}$ é uma matriz com a primeira coluna preenchida com 1 e a segunda coluna preenchida com os valores de ETo_Har, um vetor com os valores de

ETo calculados pelo método de Hargreaves-Samani.

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \quad (52)$$

Em que:

$\hat{\beta}$ é um vetor (dimensão 2) dos coeficientes do modelo linear, a ser estimados; e
 ε é um vetor de erros.

Portanto, o vetor $\hat{\beta}$ é calculado da seguinte forma (Equação 53):

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (53)$$

Já a variância do erro do modelo, σ_ε^2 , pode ser estimada da seguinte forma (Equação 54):

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{(X\beta - Y)^T (X\beta - Y)}{n - 2} \quad (54)$$

Em que:

n = número de observações na amostra.

4.7.3 Variância Média de Predição (VMP)

A fim de avaliar o grau de incerteza da estimativa da ETo, foi preciso analisar a variância de predição (VP) de cada equação Y_i , através das Equações 55 e 56 (OTSUKI, 2015):

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{(X\beta - Y)^T (X\beta - Y)}{n - 2} \quad (55)$$

$$VP = \sigma_\varepsilon^2 + X_i (X^T X)^{-1} X_i^T \quad (56)$$

Em que:

$i = (1, 2, \dots, n)$.

Logo, quanto menor a VP, melhor o resultado, ou seja: menor a incerteza da estimativa da ETo. Assim sendo, a métrica de avaliação adotada baseia-se na variância média

de predição (VMP) dessas equações, para os diferentes períodos ao longo do ano. Devido ao fato de que cada período apresenta uma VP, a variância média de predição (VMP) indica a média das VPs nos mais diversos meses, e pode ser obtida como mostra a Equação 57 (OTSUKI, 2015):

$$VMP = \sigma_{\varepsilon}^2 + \left[\frac{1}{n} \sum_i^n X_i (X^T X)^{-1} X_i^T \right] \quad (57)$$

Assim como na análise da VP, quanto menor o valor de VMP, melhor o resultado e menor a incerteza na estimativa da ETo. Para isso serão escolhidos vários períodos ao longo do ano para a aplicação da métrica de avaliação via VMP.

4.7.4 Escolha dos períodos para análise da VMP

Foram analisados vários períodos ao longo do ano, como mostrados na Tabela 6, e aplicados a métrica da VMP, de acordo com os resultados encontrados (Tabela 6), foram selecionados os períodos que apresentaram menor VMP, ou seja, Janeiro e Junho, Fevereiro a Maio (quadra chuvosa) e o 2º semestre (período mais seco), devido a permanência da ETo quase sempre superior a precipitação.

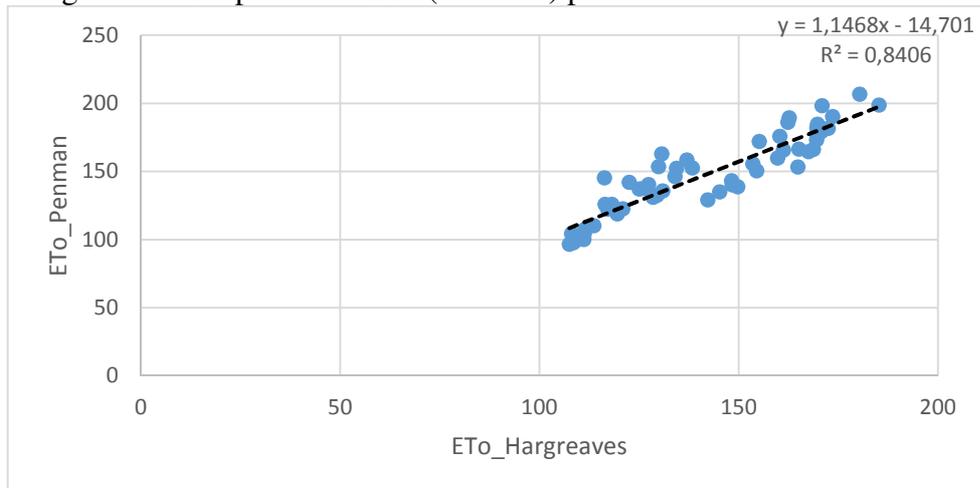
Tabela 6 – Períodos para aplicação da Variância Média de Predição (VMP).

Períodos	VMP	R²
1º Semestre	397,480	0,7924
2º Semestre	445,976	0,7351
Janeiro e Junho	139,531	0,8406
Fevereiro a Maio	140,478	0,8324
Junho a Agosto	203,508	0,8424
Outubro a Dezembro	190,740	0,4494
Dezembro a Fevereiro	198,957	0,8381

Fonte: Elaborado pelo Autor.

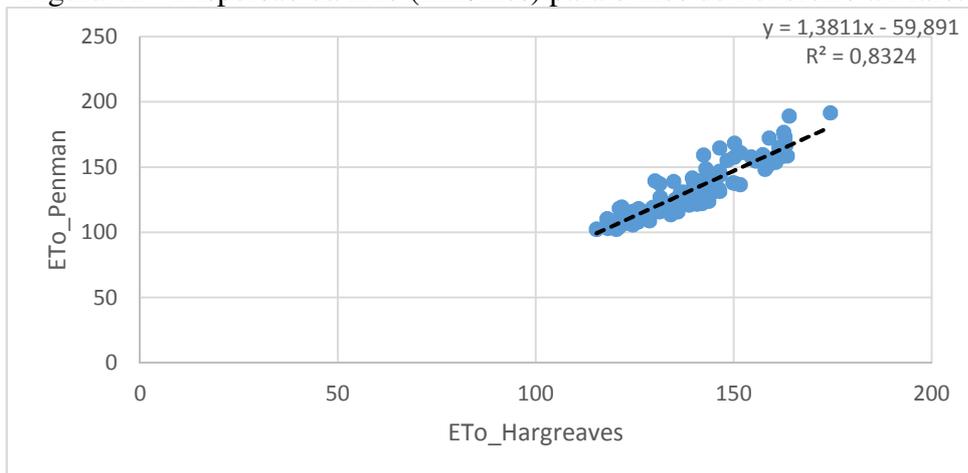
Os três períodos selecionados, com suas respectivas equações de regressão, assim como os coeficientes R², podem ser visualizados nas Figura 11 a Figura 13.

Figura 11 – Dispersão da ETo (mm/mês) para o mês de Janeiro e Junho.



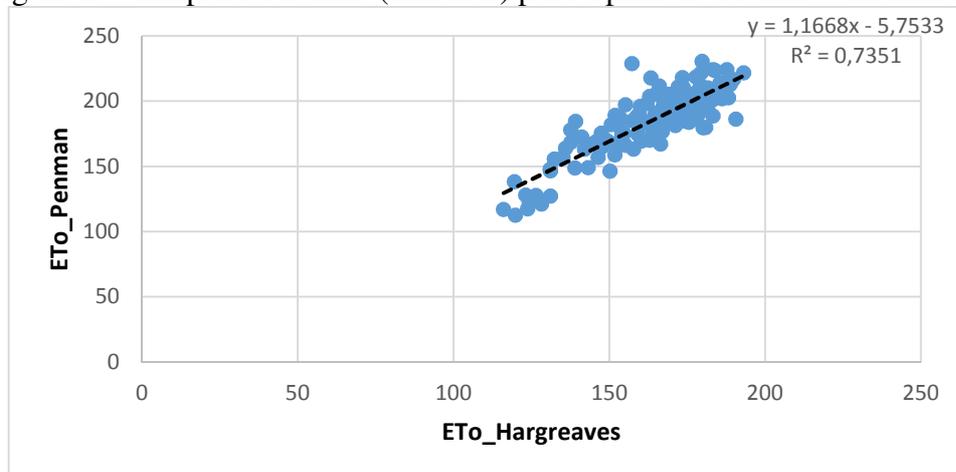
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 12 - Dispersão da ETo (mm/mês) para o mês de Fevereiro a Maio.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 13 – Dispersão da ETo (mm/mês) para o período de Julho a Dezembro.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Conclui-se que, diante das condições de baixa disponibilidade dos dados utilizados na estimativa da ETo, apresentando muitas falhas, foi possível encontrar um resultado satisfatório da VMP, ou seja, mostrando que é bastante razoável a adoção preliminar do método de Penman-Monteith FAO56 para corrigir a ETo dos modelos do CMIP5 estimada por Hargreaves-Samani.

4.7.5 Utilização da Correção

Foi utilizado um modelo de regressão entre as ETos de Penman-Monteith FAO56 e Hargreaves-Samani, incluindo a variância do erro do modelo. A partir deste modelo de regressão, foi realizada uma análise da Variância Média de Predição (VMP) para diferentes períodos do ano, de modo a identificar formulações deste modelo que variem sazonalmente. Para tanto, uma vez encontrada uma boa relação, é possível estabelecer uma equação que represente a variabilidade sazonal da ETo.

Com isso, estas equações podem ser utilizadas para a correção dos dados resultantes dos modelos de Circulação Global. Os modelos identificados serão utilizados para transformar as estimativas de Hargreaves-Samani em Penman-Monteith FAO56, permitindo, assim, uma melhor descrição da variabilidade sazonal da ETo. Portanto, para cada (x) valor de Hargreaves-Samani obtido pelos modelos após corrigidos, corresponderá a um (Y) valor de Penman-Monteith FAO56 obtido ou um valor Hargreaves-Samani transformado, ou seja: obter Penman-Monteith FAO56 em função de Hargreaves-Samani P(H), como mostrado na Equação 58:

$$y = bx + a \quad (58)$$

Em que:

- y = Valor de Penman a ser obtido, correspondente ao período selecionado; e
- x = Valor de Hargreaves corrigido, correspondente ao período selecionado.

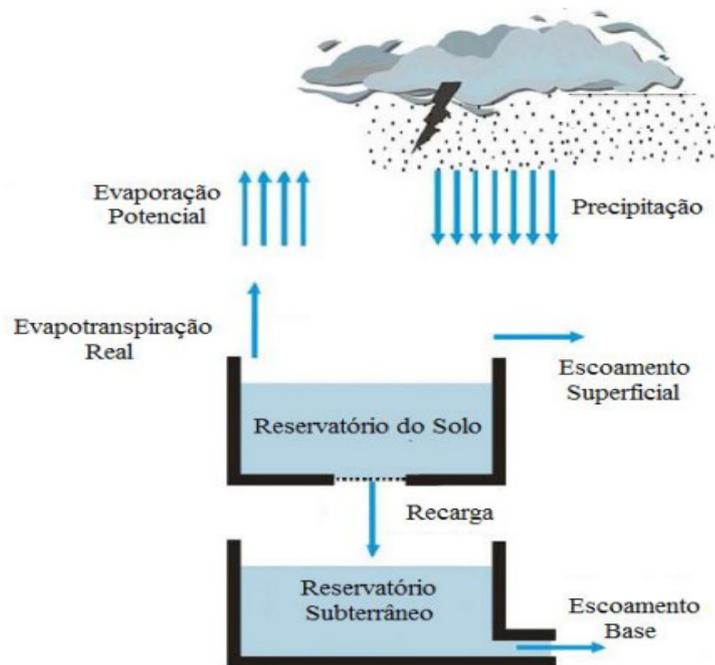
O passo seguinte consiste em verificar se P_(OBS) possui forte correlação com P(H). Caso possua forte correlação, tem-se um ganho bastante relevante para estimativa da ETo, uma vez que, assim, as variáveis envolvidas no método de Penman-Monteith FAO56 melhor representam a ETo para os períodos analisados.

4.8 Modelagem Hidrológica

4.8.1 SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure)

O SMAP é um modelo de simulação hidrológica do tipo transformação chuva em vazão, conceitual e concentrado, desenvolvido por Lopes *et al.* (1981), e tradicionalmente empregado na Engenharia de Recursos Hídricos brasileira. Apresenta uma estrutura simples, para séries contínuas, sendo sua versão mensal de acordo com a Figura 14.

Figura 14 – Modelo SMAP, versão mensal.



Fonte: Adaptado de Buchianeri (2004 *apud* Nunes *et al.*, 2014).

O modelo SMAP busca representar o armazenamento e os fluxos de água na bacia através de reservatórios lineares fictícios, de maneira semelhante a outros modelos conceituais. O modelo realiza o balanço da umidade do solo baseado em dois reservatórios lineares que representam o solo e o aquífero (CAPONI & SILVA, 2011). A estrutura para esse estudo é a versão mensal, conforme pode ser vista na Figura 14.

O modelo SMAP em sua versão mensal é constituído de dois reservatórios matemáticos, cujas variáveis de Estado são atualizadas a cada mês, na forma (LOPES, 1999):

$$R_{\text{solo}}(i+1) = R_{\text{solo}}(i) + P - E_s - E_r - \text{Rec} \quad (59)$$

$$R_{sub}(i+1) = R_{sub}(i) + Rec - Eb \quad (60)$$

inicialização: $R_{solo}(1) = T_{uin} \cdot Str \quad (61)$

$$R_{sub}(1) = E_{bin} / (1 - Kk) / Ad \cdot 2630 \quad (62)$$

Em que:

$R_{solo}(i)$ = o volume de água acumulado no reservatório do solo no mês i , em mm;

$R_{sub}(i)$ = o volume de água acumulado no reservatório subterrâneo no mês i , em mm;

P_i = a precipitação média na bacia no mês i , em mm;

$E_s(i)$ = a lâmina de escoamento superficial no trecho do rio no mês i , em mm;

$E_r(i)$ = a evapotranspiração real na bacia no mês i , em mm;

$Rec(i)$ = a recarga transferida do reservatório do solo para o reservatório subterrâneo no mês i , em mm;

Kk = constante de recessão ($mês^{-1}$); e

$E_b(i)$ é o escoamento de base no mês i , em mm.

A inicialização e as funções de transferência de água entre os reservatórios são definidas como mostrado nas Equações 63 a 69 (NUNES *et al.*, 2014):

$$R_{solo}(1) = T_{uin} Str \quad (63)$$

$$R_{solo}(1) = \frac{E_{bin} 2630}{Ad (1 - 0,5^{1/k})} \quad (64)$$

$$E_s(i) = T_u(i)^{Pes} P(i) \quad (65)$$

$$E_r(i) = T_u(i - 1) Ep(i) \quad (66)$$

$$Rec(i) = C_{crec} T_u(i - 1)^4 R_{solo}(i - 1) \quad (67)$$

$$E_b(i) = (1 - 0,5^{1/k}) R_{sub}(i - 1) \quad (68)$$

$$T_u(i) = \frac{R_{solo}(i)}{Str} \quad (69)$$

Em que:

T_{uin} = taxa de umidade inicial do solo, adimensional;

E_{bin} = vazão básica inicial, em m^3/s ;

E_d = área de drenagem da bacia, em km^2 ;

$E_p(i)$ = evaporação potencial na bacia no mês i , em mm ;

$T_u(i)$ = teor de umidade no mês i , adimensional.

Os quatro parâmetros ajustáveis do modelo foram: (a) a capacidade de saturação do solo (SAT), em mm ; (b) o parâmetro de escoamento superficial ($P e s$), adimensional; (c) o coeficiente de recarga do reservatório subterrâneo (CREC), adimensional; e (d) a constante de recessão (KK), em $(mês^{-1})$.

Finalmente, o cálculo da vazão $Q(i)$ no mês i , dada em m^3/s , é realizado por meio da Equação 70.

$$Q = \frac{[Es(i) + Eb(i)]Ad}{2630} \quad (70)$$

4.8.2 Calibração e Validação do Modelo SMAP

Os dados de entrada para a calibração e validação do SMAP são a série mensal média de precipitação, as médias mensais de evapotranspiração potencial (Hargreaves-Samani e Penman-Monteith FAO56) e a médias de vazão. Para os processos de calibração e validação realizados, foi utilizada uma série de 10 anos de dados. Devido ao elevado número de falhas nas séries, como já mostrado anteriormente, o período utilizado para calibração foi de Janeiro/1961 a Julho/1971, enquanto o de validação foi de Janeiro/1976 a Maio/1986.

Para o cálculo dos parâmetros do SMAP, dois deles são considerados nulos: o CREC (parâmetro de água subterrânea) e o Kk (coeficiente de recessão de escoamento básico), conforme resultados encontrados por Diniz (2001) e Alexandre *et al.* (2005).

Estes autores concluíram que, em decorrência das características da região semiárida, predominantemente de solos rasos e assentes sobre rochas impermeáveis, os resultados das calibrações do modelo SMAP revelaram a quase inexistência de recargas para os reservatórios subterrâneos.

Os parâmetros do modelo a serem calibrados são: SAT, capacidade de saturação do solo, variando entre 100 e 2.000, e o Pes, parâmetro de escoamento superficial, variando entre 0 e 10. O TUIN, teor de umidade inicial, foi considerado como padrão, de 30%, enquanto o EBIN, vazão subterrânea básica, foi considerado como sendo zero.

4.8.3 Funções Objetivo

Durante as etapas do processo de calibração e validação, faz-se necessária a utilização de alguma medida que possa dar uma ideia de quão boa é a representação do modelo para um determinado conjunto de parâmetros. Um indicador dessa representatividade pode ser uma medida da proximidade entre as vazões simuladas e as vazões observadas na natureza (Barros, 2007).

Dentre os tipos de funções objetivo frequentemente utilizados na literatura, aquelas que se baseiam na minimização da soma dos erros quadráticos têm maior destaque e, por essa razão, serão abordadas no presente trabalho, a função proposta por Nash & Sutcliffe (1970), para a série completa, conforme Equação 71, e para série de picos, conforme Equação 72. Quanto mais próximo do valor 1,0 (ou 100%), melhor o resultado da calibração e/ou validação.

I) Para série de dados completos

$$fo_1 = \max \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^{obs} - Q(\theta)_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \right) \quad (71)$$

Em que:

θ = representa o conjunto de parâmetros calibráveis do modelo;

Q_i^{obs} = a série de vazões observadas;

Q_i^{sim} = a série de vazões simuladas;

N = o comprimento das séries;

\bar{Q}^{obs} = o valor médio da série de vazões observadas.

A outra função objetivo utilizada procura minimizar as distâncias entre as vazões de pico da série observada e valores obtidos através da simulação. É dada pela aplicação das séries de vazões de pico e vazões simuladas para o mesmo intervalo de tempo à função de eficiência de Nash & Sutcliffe (1970), como mostrado a seguir:

II) Para série de picos

$$fo_1 = \max \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Qp_i^{obs} - Qp(\theta)_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Qp_i^{obs} - \bar{Qp}^{obs})^2} \right) \quad (72)$$

Em que:

θ = representa o conjunto de parâmetros calibráveis do modelo;

Qp_i^{obs} = a série das vazões de pico observadas;

Qp_i^{sim} = a série das vazões de pico simuladas;

N = o comprimento das séries; e

\overline{Qp}^{obs} = o valor médio das vazões de pico observadas.

Os resultados estão mostrados logo abaixo, nas Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados obtidos pela Funções Objetivo, para calibração (01/1961-07/1971) e validação (01/1976-05/1986).

	Calibração		Validação	
	NASH Série completa	NASH Picos	NASH Série completa	NASH Picos
Penman	83,12	86,32	86,28	90,79
Hargreaves	84,23	86,53	88,06	92,53

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Tabela 8 mostra o resultado dos parâmetros calibrados do modelo SMAP.

Tabela 8 – Parâmetros calibrados do modelo SMAP.

	SAT (mm)	CREC (ad.)	Pes (ad.)	Kkt (mês)	TUIN %	EBIN (m ³ /s)
Penman	1969,29	0	3,139	0	30	0
Hargreaves	1759,83	0	3,32297	0	30	0

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A seguir, serão mostrados os resultados obtidos pela aplicação da metodologia adotada.

5 RESULTADOS

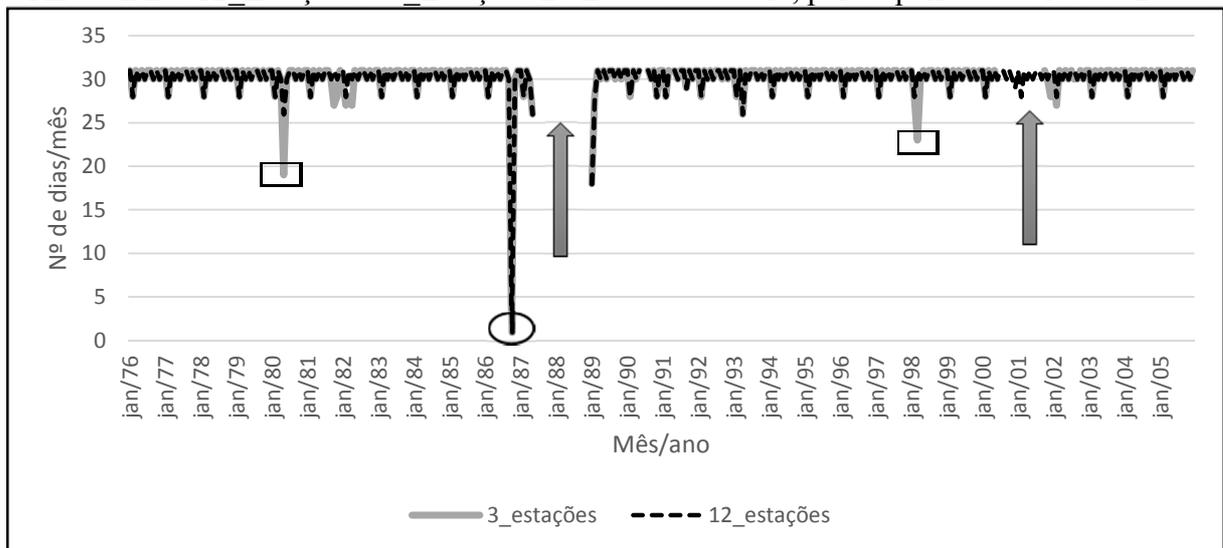
5.1 Análise do Impacto da falta de tratamento dos dados nas conclusões sobre tendências observadas nas variáveis: temperaturas máxima, mínima, média, umidade relativa do ar, vento, além da ETo (mensal, semestral e anual)

5.1.1 Análise da variabilidade temporal do número de dias como critério de escolha para cálculo do acumulado mensal da ETo

Como anteriormente mencionado, a escolha do número de dias seguiu o critério de exclusão de dias sem todas as variáveis consecutivas. Diante do percentual de falhas encontrado em todas as estações, houve a necessidade de se verificar a comportamento dos dados, tanto para as 12 Estações quanto para as 3 Estações com menor percentual de falhas, a fim de identificar problemas relacionados à variabilidade na série de dados.

No entanto, analisando a série temporal, pôde-se notar que, de fato, o número de dias correspondentes a cada mês sofre variação significativa (ver Figura 15), pois existem meses registrando menos de 5 dias (*marcados com círculo*), 20 e 25 dias (*marcado com quadrado*), além de períodos (anos) inteiros sem registros, impactando diretamente na ETo mensal.

Figura 15 – Série temporal do número de dias com dados em cada mês, com realização do Thiessen nas 12 Estações e 3 Estações no Estado do Ceará, para o período de 1976 a 2005.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

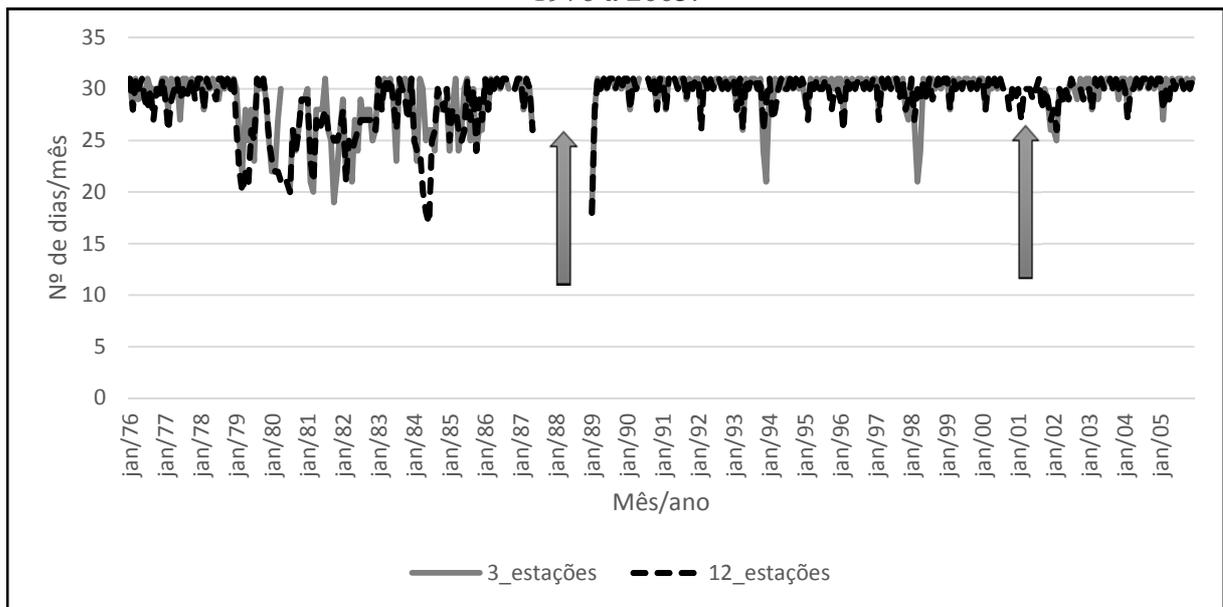
O valor atípico (*marcado com círculo*) para ambos os métodos, em que o registro era de menos de 5 dias, corresponde a falhas na série. Nesta mesma Figura 15, a seta indica uma interrupção na série e/ou ausência total de dados nas estações. Essa informação traz

consigo um questionamento sobre quais estações serão escolhidas para tomar como base de referência para o clima presente.

Esse resultado, como mostrado na Figura 15, não traz coerência para a obtenção do acumulado mensal, uma vez que mesmo aplicado o método de Thiessen, ainda surgiram meses registrando menos de 5 dias. Esse tipo de comportamento na série não representa a quantidade dos dias de cada mês, impactando diretamente nos resultados.

Para tanto, fez-se necessário um ajuste na série, almejando escolher a quantidade de dias em cada mês que melhor representasse o acumulado mensal. Com isso, foram escolhidos os meses que apresentaram um número de dias superiores a 15 em todas as estações, e logo após aplicado o Thiessen, foram obtidos os resultados mostrados na Figura 16.

Figura 16 – Série temporal do número de dias superiores a 15 dias em cada mês, com realização do Thiessen nas 12_Estações e 3_Estações no Estado do Ceará, para o período de 1976 a 2005.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Assim, diante dessa análise, para estimativa da ETo mensal foi escolhido a série temporal com número de dias superiores a 15 dias em cada mês.

A seguir, serão mostradas as séries temporais da ETo estimadas por Penman-Monteith FAO 56 e por Hargreaves-Samani.

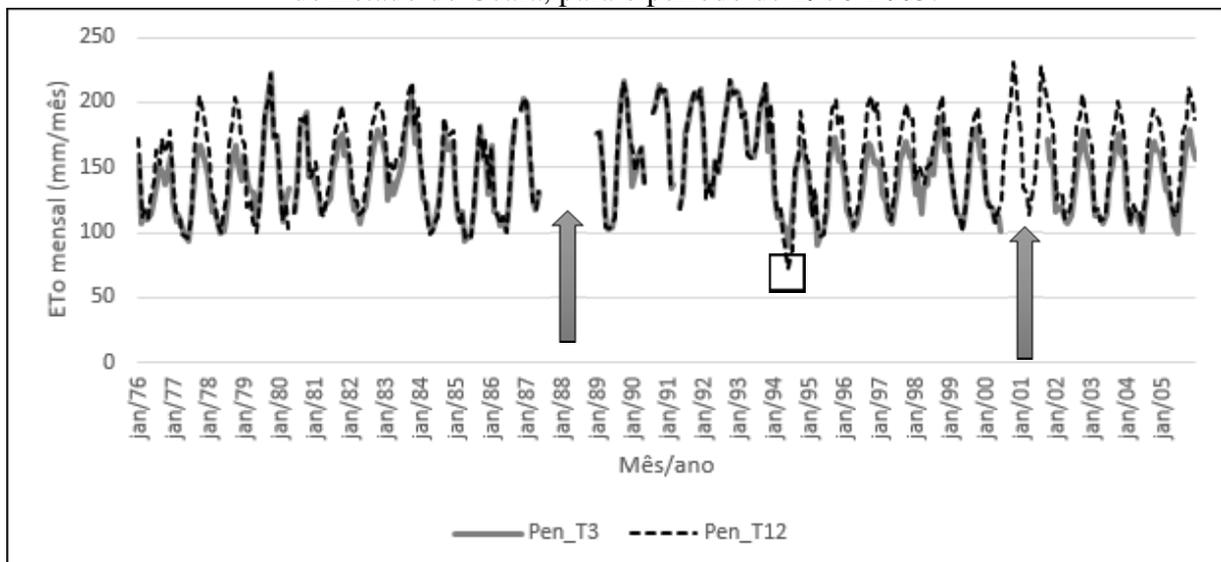
5.1.2 Método de Penman-Monteith FAO 56

Analisando a Figura 17, foi possível perceber que o Thiessen dos acumulados

mensais da ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO 56 para as 3_Estações (Pen_T3) conseguiu acompanhar o comportamento da ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO 56. O Thiessen realizado para as 12_Estações do Ceará (Pen_T12), em sua maioria, subestimou os resultados, como mostrado na referida figura.

O valor atípico (*marcado com quadrado*) para ambos os métodos, registrou os menores acumulados da série, com 89,35 mm/mês (Pen_T3) e aproximadamente 71 mm/mês (Pen_T12), ambos referentes a Junho de 1994. A seta indica uma interrupção na série e/ou ausência total de dados nas estações.

Figura 17 – Série temporal da ETo mensal, estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56, com realização do Thiessen em 3_Estações (Pen_T3) e nas 12_Estações (Pen_T12) do Estado do Ceará, para o período de 1976-2005.

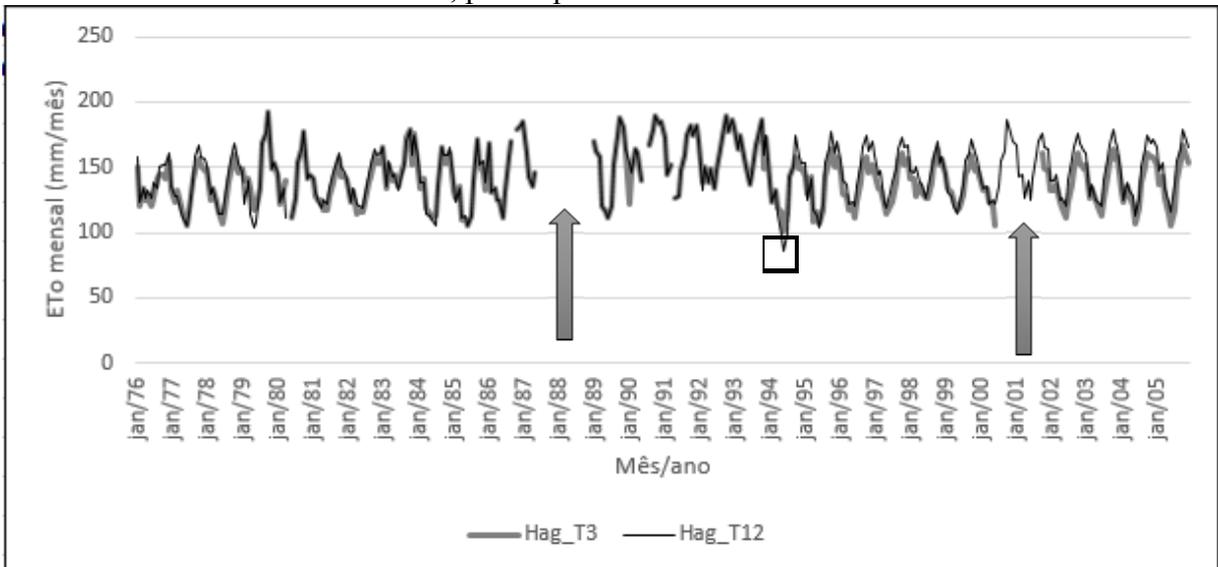


Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.1.3 Método de Hargreaves-Samani

Fazendo a mesma análise para o método de Hargreaves-Samani, pôde-se verificar bom comportamento do Thiessen da ETo mensal nas 3_Estações (Hag_T3) quando comparado às 12_Estações (Hag_T12), apresentando leve subestimativa (Figura 18). O valor atípico (*marcado com quadrado*) para ambos os métodos, apontou os menores acumulados da série, com 100,18 mm/mês (Hag_T3) e 86,11 mm/mês (Pen_T12), ambos referentes a Junho de 1994.

Figura 18 – Série temporal da ETo mensal estimada pelo método de Hargreaves-Samani, com realização do Thiessen em 3_Estações Hag_T3 e nas 12_Estações Hag_T12 do Estado do Ceará, para o período de 1976-2005.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

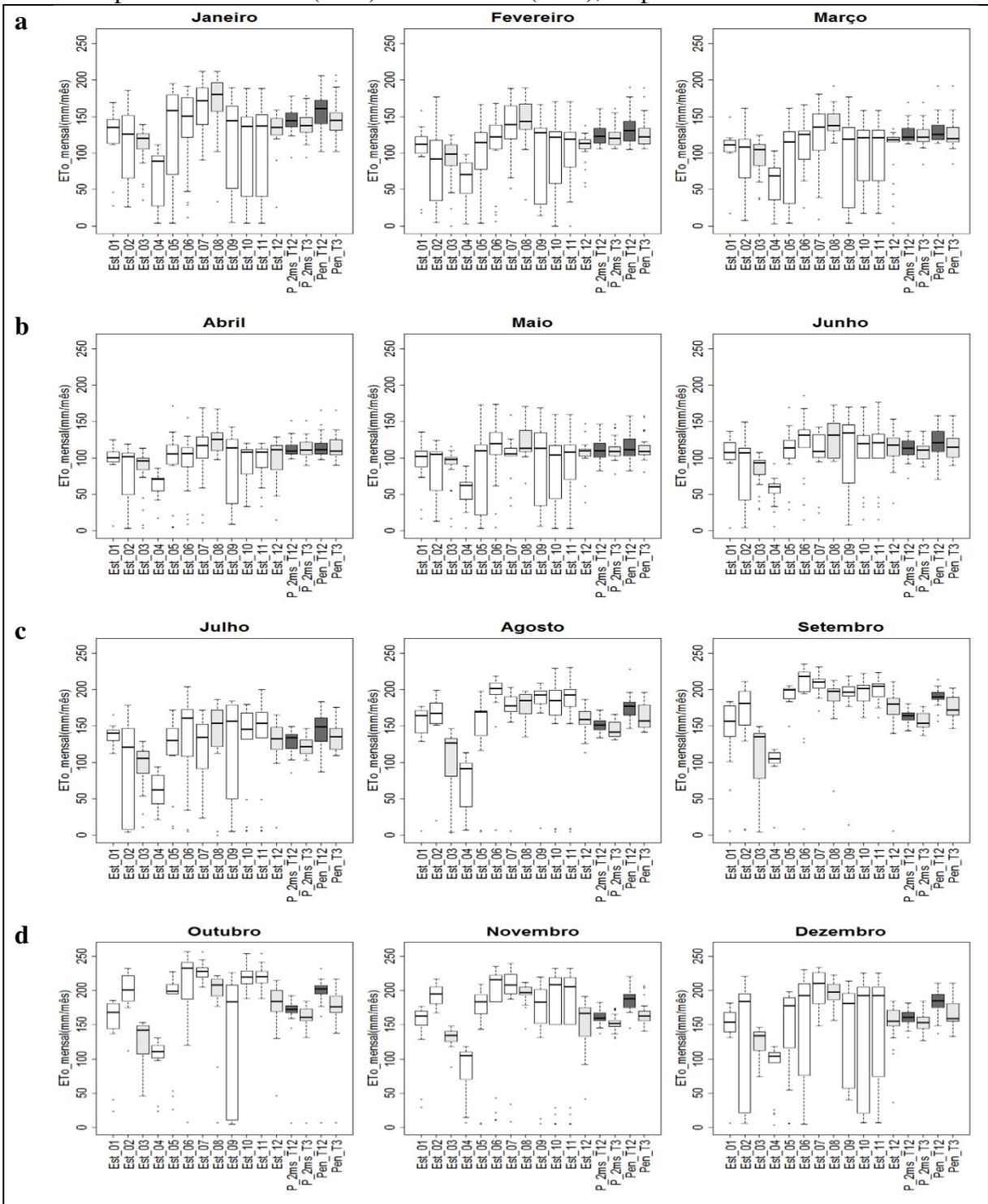
5.1.4 Impacto da falta de tratamento dos dados na análise da ETo mensal

Diante do contexto de influência da quantidade de falhas no resultado final da ETo, resolveu-se analisar a dispersão, a fim de verificar, dentre as 12 estações, qual o grau de influência das 3 estações com menor percentual de falhas no resultado final da ETo, ou seja, no acumulado mensal. Logo em seguida, foi aplicado o Thiessen 3_estações e comparado com o Thiessen 12_Estações.

5.1.4.1 Análise do acumulado e dispersão da ETo mensal obtido com todos os dados da série

Analisando a Figura 19, para a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 e Penman-Monteith FAO56 considerando a velocidade do vento de 2m/s, pode-se notar claramente a influência das falhas no comportamento da ETo em cada mês, no entanto, ficou evidente que quando realizado o Thiessen das estações, os resultados exibem uma melhora significativa, quando refere-se a variabilidade e ao acumulado mensal, porém, não pode ser adotado devido a elevada dispersão da ETo entre as estações, ao qual não representa a variabilidade e o acumulado mensal, reforçando a necessidade de tratamento na série.

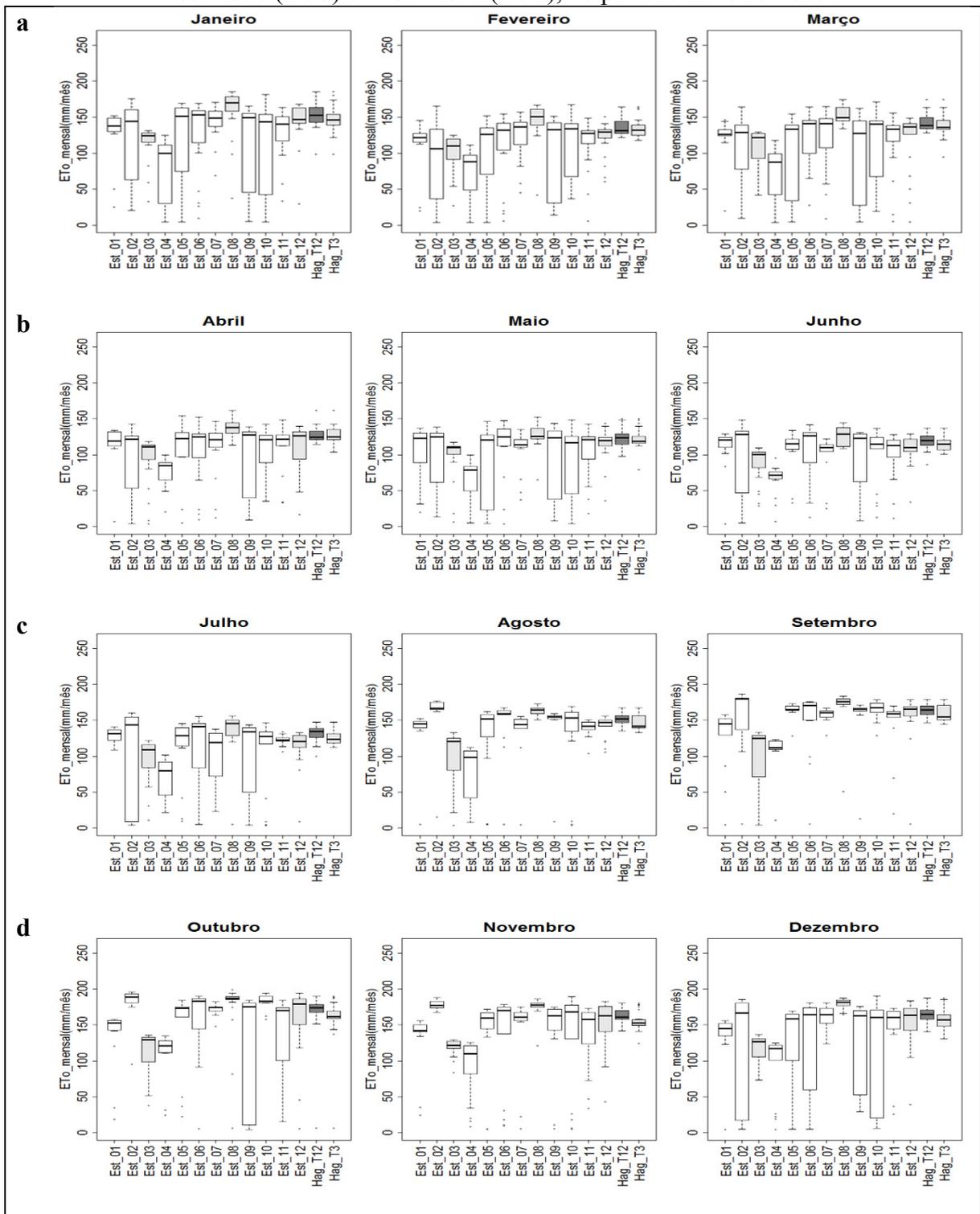
Figura 19 – ETo mensal de cada estação, obtido com todos os dados da série, juntamente com Thiessen das 12_Estações e 3_Estações estimadas pelo método de Penman-Monteith FAO56, para o 1º semestre (a e b) e 2º semestre (c e d), no período de 1976-2005.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A mesma analogia pode ser aplicada quando a ETo foi estimada pelo método de Hargreaves-Samani (Figura 20).

Figura 20 – ETo mensal de cada estação, obtido com todos os dados da série, juntamente com Thiessen das 12_Estações e 3_Estações estimadas pelo método de Hargreaves-Samani, para o 1º semestre (a e b) e 2º semestre (c e d), no período de 1976-2005.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

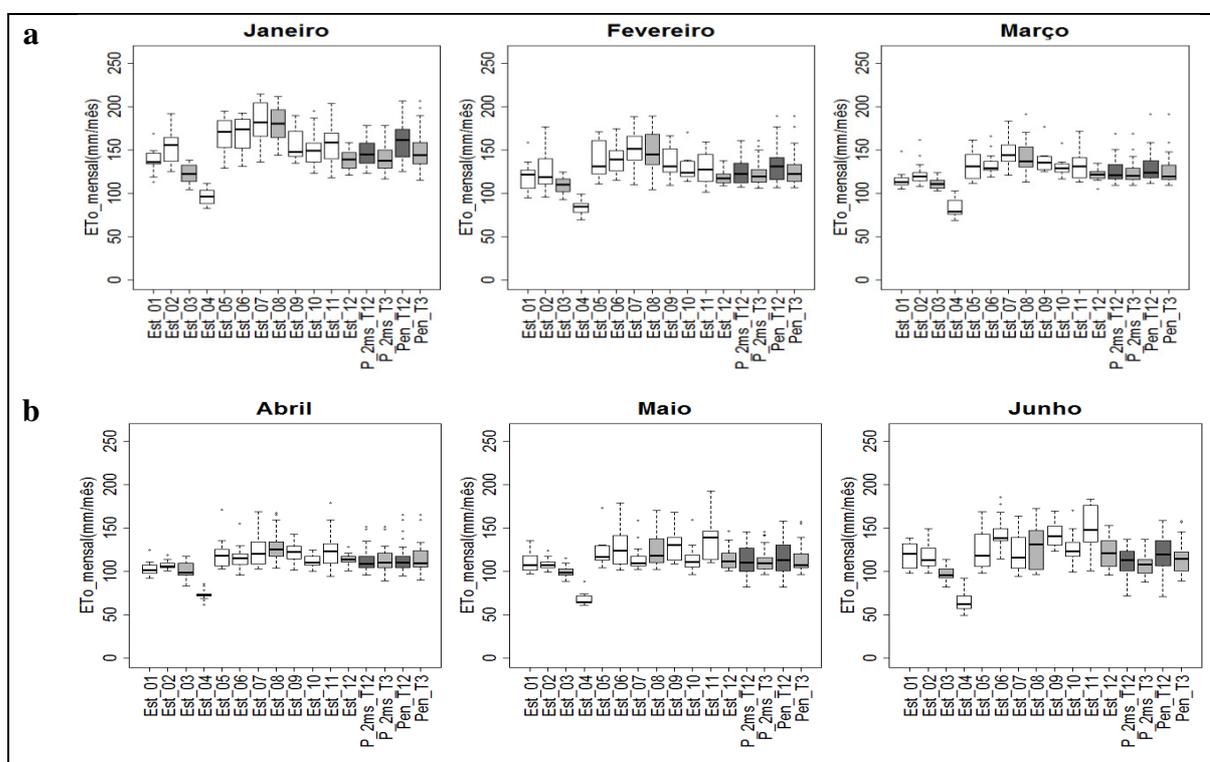
Portanto, fez-se necessária a obtenção duma forma de tratamento nas séries em cada estação, conforme mostrado a seguir.

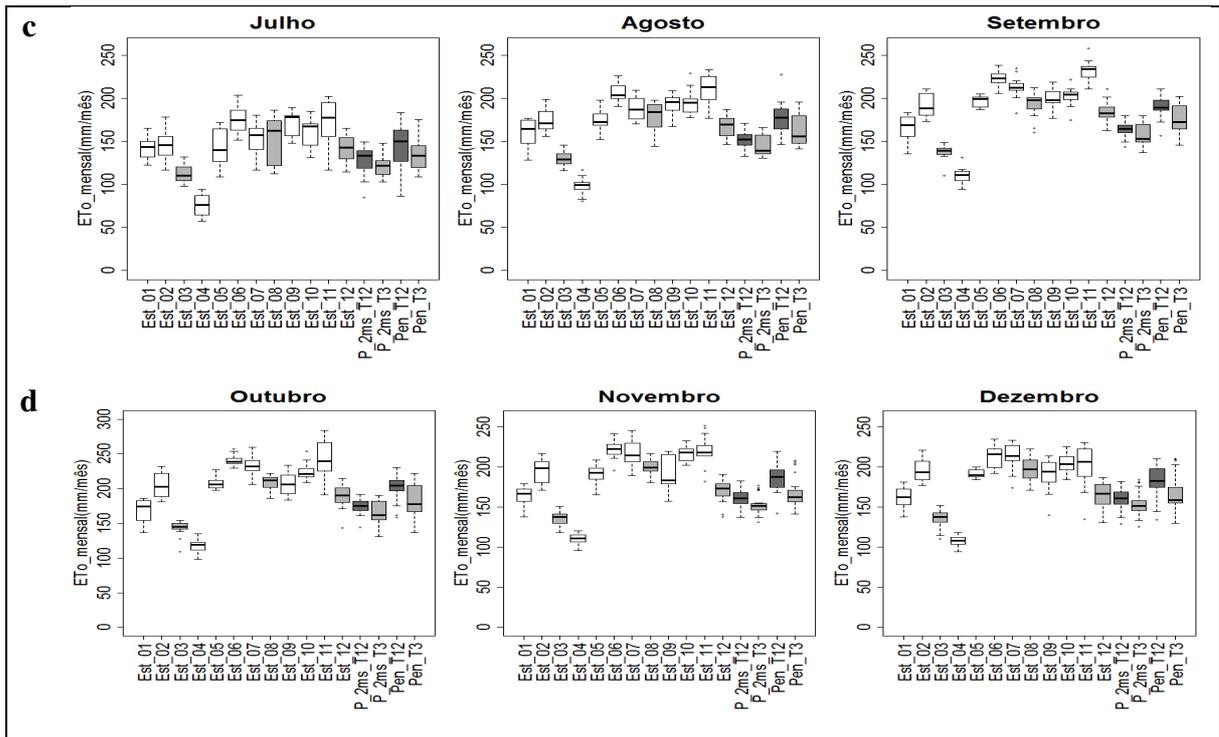
5.1.4.2 Análise do acumulado e dispersão da ETo mensal obtido com dados da série acima de 15 dias

Adotando a métrica para cada mês, considerando apenas a quantidade de dias como superiores a 15 dias, os resultados apontaram (Figura 21 e Figura 22), que, com essa métrica, tanto a variabilidade mensal quanto o acumulado mostram melhoras significativas, quando comparado as análises das figuras Figura 19 e Figura 20.

Para o método de Penman-Monteith FAO56 aplicado às 3 estações (Pen_T3), pôde-se notar que os totais se posicionaram abaixo daqueles encontrados por Pen_T12 no decorrer do ano, sendo mais expressivo no 2º semestre e, em alguns meses, como setembro e outubro (Figura 21c e Figura 21d), mostrando-se inclusive com maior dispersão, podendo-se inferir que essas estações possuem um papel importante na construção da ETo média, podendo até serem consideradas como uma alternativa de representatividade da ETo média do Ceará (Figura 21).

Figura 21 – ETo mensal de cada estação, obtido com dados da série acima de 15 dias, juntamente com Thiessen das 12_Estações e 3_Estações estimadas pelo método de Penman-Monteith FAO56, para o 1º semestre (a e b) e 2º semestre (c e d), no período de 1976-2005.

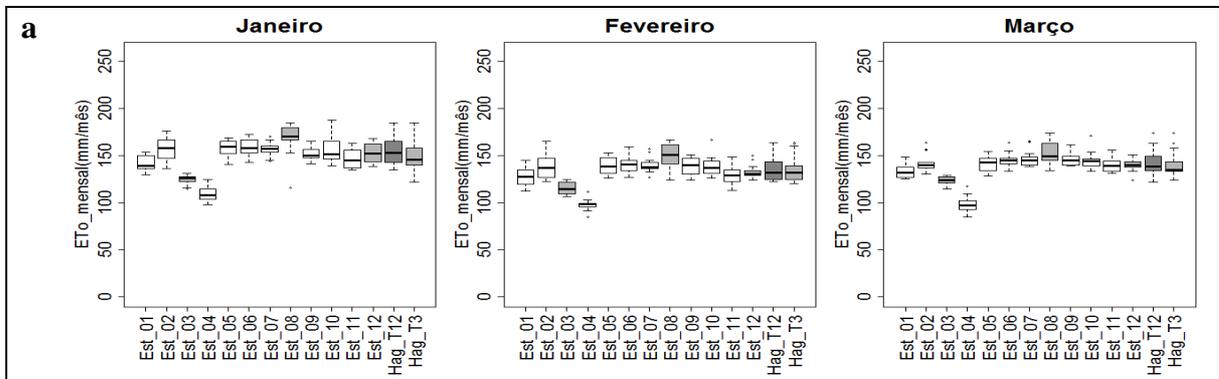


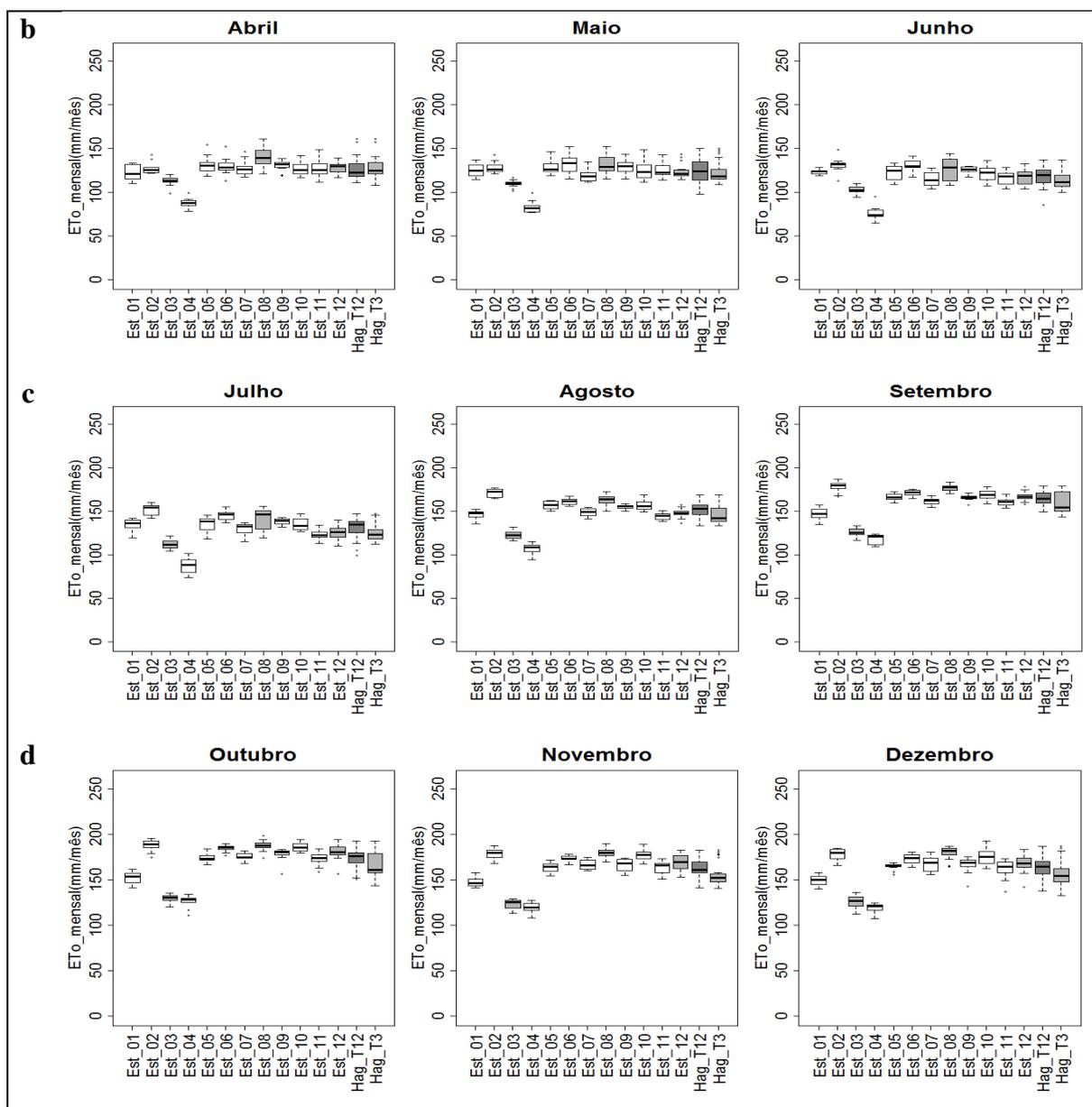


Fonte: Elaborado pelo Autor.

O mesmo pôde ser constatado para o método de Hargreaves-Samani, onde a ETo mensal estimada para 3_Estações (Hag_T3) mostrou comportamento semelhante à análise anterior, permanecendo abaixo dos valores da ETo estimada para 12_Estações (Hag_T12). Para tanto, apresentaram semelhança nas medias em Fevereiro, Março e Abril (Figura 22a e Figura 22b).

Figura 22 – ETo mensal de cada estação, obtido com dados da série acima de 15 dias, juntamente com Thiessen das 12_Estações e 3_Estações estimadas pelo método de Hargreaves-Samani, para o 1º semestre (a e b) e 2º semestre (c e d), no período de 1976-2005.





Fonte: Elaborado pelo Autor.

Portanto, diante de tudo o que foi discutido, torna-se necessário verificar se essas variáveis, mesmo perante a ausência de dados, possuem comportamento tendencioso na escala temporal. Em seguida será discutido a análise de tendências em todas as variáveis envolvidas no processo de estimativa da ETo, além da ETo semestral e a nível anual.

Primeiramente, pelo teste de hipótese *t de student*, em seguida por Mann-Kendall sen. Além da aplicação do teste de hipótese da diferença de médias, afim de verificar o grau de significância na diferença entre as médias da ETo a nível de clima presente e projeções futuras. Todos os testes de hipóteses foram aplicados a um nível de significância de 5%, ou melhor, $\alpha = 0,05$.

5.1.5 *Análise de Tendências*

Neste capítulo, em função da grande variabilidade temporal dos dados, serão verificadas as tendências, através do teste de hipóteses *t de Student*, nas variáveis necessárias à estimativa da ETo, além da aplicação do referido teste na ETo. Para isso, serão adotados, como base de comparação, todas as estações que compreendem a área de estudo (12_Estações) e as três que apresentaram um menor percentual de falhas (3_Estações).

As análises serão efetuadas a nível semestral e anual. A nível semestral, serão analisadas estação por estação (variável a variável); Thiessen das estações (variável a variável) e Thiessen das estações com relação à (ETo). A nível anual, apenas o Thiessen da ETo.

5.1.6 *Tendência semestral das variáveis: estação por estação por (t de student)*

Avaliando o comportamento tendencioso das variáveis da Tabela (7, para o 1º e 2º semestres, o teste indicou um maior número de estações apontando tendência crescente significativa nas temperaturas, principalmente no 2º semestre, e em especial, a temperatura média (T_{med}), que apontou unânime tendência crescente significativa em todas as estações.

Em relação ao vento, apenas a Estação 11 (E.11) apresentou tendência de aumento, mas, entre as demais, umas produziram padrões de vento dentro da normalidade, enquanto que, para outras, o teste indicou tendência decrescente.

Para a umidade relativa (UR), o teste indicou, para o 1º semestre, que essa variável não apresentou tendência, e para o 2º semestre, apenas uma estação (E.1) assinalou tendência crescente e duas, tendência decrescente (E.3 e E.9) (ver Tabela 9).

Vale salientar que a maior dificuldade é interpretar essa “possível” tendência nas variáveis observadas, uma vez que as séries dispõem de poucos dados, e além do mais, como se está trabalhando com dados diários e a análise está sendo feita a nível mensal, isto acarreta uma grande incerteza em relação aos acumulados mensais, pois há meses que apresentam apenas um, três, dez dias etc., e assim sucessivamente, o que gera grande dispersão nos resultados.

Por isso, existe a necessidade de detalhamento dessa análise, como mostrado nos tópicos a seguir. Vale ressaltar que foi aplicado nas variáveis: Temperatura máxima, mínima e média, umidade relativa do ar (UR) e vento, estação por estação, apenas o teste de hipótese *t de student*. Os valores da probabilidade p-valor, ou apenas (p), menores que o nível de significância, ou seja, $p < \alpha$, exibidos na Tabela 9, reforçam a informação do aumento e/ou

diminuição significativa das variáveis, quando submetidas à aplicação teste t de student. Todavia, quando, $p > \alpha$, confirma um aumento e/ou diminuição insignificante das variáveis.

Tabela 9 – Teste de hipótese aplicado as variáveis: Temperatura máxima, mínima e média, umidade relativa do ar (UR) e vento, estação por estação.

Variáveis	TMAX		TMIN		TMED		UR		VENTO	
	1º Sem	2º Sem								
E.1	X	X	X	X	X	X	0	X	-X	-X
p	1E-4	1E-9	3E-4	2E-3	2E-4	4E-7	9E-2	2E-3	7E-3	1E-4
E.2	0	X	0	-X	0	X	0	0	-X	-X
p	2E-1	3E-4	2E-1	3E-2	9E-1	5E-3	2E-1	1E-1	2E-4	3E-3
E.3	X	X	0	0	0	X	0	-X	-X	-X
p	4E-3	2E-5	2E-1	2E-1	6E-2	5E-3	1E-1	3E-3	1E-2	1E-3
E.4	0	0	0	X	X	X	0	0	-X	-X
p	7e-2	8E-2	7E-1	3E-2	2E-2	2E-2	7E-1	2E-1	3E-2	5E-3
E.5	0	X	X	0	X	X	0	0	0	0
p	6E-1	2E-3	1E-3	2E-1	3E-2	2E-3	8E-1	4E-1	2E-1	6E-2
E.6	0	X	0	X	0	X	0	0	-X	0
p	2E-1	3E-4	1E-1	5E-2	2E-1	9E-4	9E-1	1E-1	7E-3	5E-1
E.7	X	X	0	X	0	X	0	0	0	-X
p	5E-2	2E-3	1E-1	2E-3	1E-1	7E-3	8E-1	3E-1	2E-1	4E-2
E.8	0	0	0	X	0	X	0	0	0	-X
p	9E-1	7,6E-	9E-2	4E-2	8E-2	2E-2	8E-1	2E-1	8E-2	2E-4
E.9	X	X	X	0	X	X	0	-X	0	0
p	4E-2	1E-5	4E-2	6E-1	7E-3	3E-4	7E-1	2E-3	7E-1	7E-1
E.10	X	X	0	X	X	X	0	0	0	0
p	2E-2	7E-4	2E-1	3E-2	2E-3	3E-4	1E-1	2E-1	1E-1	2E-1
E.11	0	X	X	0	X	X	0	0	0	X
p	9E-2	2E-2	2E-2	1E-1	2E-2	1E-2	5E-1	8E-2	5E-1	2E-2
E.12	X	X	X	X	X	X	0	0	-X	0
p	2E-2	3E-4	1E-6	1E-4	1E-4	1E-4	7E-1	9E-1	5E-3	6E-1

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Legenda: (X) tendência crescente, (-X) tendência decrescente e (0) não apresenta tendência.

5.1.7 Tendência semestral das variáveis: Thiessen das estações por (t de student)

Ao se detectar o comportamento tendencioso (ou não-tendencioso) de algumas variáveis, com a análise estação por estação, ficou patente a importância de se analisar separadamente todas as estações (12_Estações) e as três de maior densidade de dados, E.03, E.08 e E.12 (3_Estações), com o objetivo de verificar a influência da grande variabilidade nas séries de dados no processo tendencioso de cada variável e, conseqüentemente, na ETo.

Primeiramente, foi realizado o Thiessen de todas as variáveis nas 12_Estações (ver Tabela 9). Em seguida, para as 3_Estações, percebendo-se que o comportamento das tendências individuais tornou-se mais evidente no grupo das 12_Estações (Tabela 10) que no das 3_Estações (Tabela 11). Esse comportamento foi reforçado pelo predomínio tendencioso crescente das temperaturas nos 2 semestres, pois $p < \alpha$, à exceção de T_{med} no 1º semestre, que se comportou dentro da normalidade, pois $p > \alpha$, e igualmente para UR e o vento indicando tendência decrescente apenas para o 1º semestre (Tabela 10).

Tabela 10 - Teste de hipótese aplicado ao Thiessen das variáveis: Temperaturas máxima, mínima e média, umidade relativa do ar (UR) e vento para o grupo das 12_Estações.

Variáveis	TMAX		TMIN		TMED		UR		VENTO	
	1º Sem	2º Sem								
Thiessen	0	X	X	X	0	X	0	0	-X	0
p	2E-1	2E-3	8E-8	2E-4	7E-2	3E-4	9E-1	1E-1	3E-2	5,3E-2

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Legenda: (X) tendência crescente, (-X) tendência decrescente e (0) não apresenta tendência.

Diferentemente da análise das 3_Estações, em que apenas a temperatura mínima (T_{min}) apresentou tendência crescente para os 2 semestres, com $p < \alpha$, e T_{med} no 2º semestre, a temperatura máxima (T_{max}) e a umidade relativa do ar (UR) não apresentaram tendências em nenhum dos semestres, uma vez que $p > \alpha$. Já a o vento, manteve-se dentro do padrão normal no 1º semestre, mas com tendência decrescente no 2º semestre (Tabela 11).

Tabela 11 – Teste de hipótese aplicado ao Thiessen das variáveis: Temperaturas máxima, mínima e média, umidade relativa do ar (UR) e vento para o grupo das 3_Estações.

Variáveis	TMAX		TMIN		TMED		UR		VENTO	
	1º Sem	2º Sem								
Thiessen	0	0	X	X	0	X	0	0	0	-X
p	5E-1	5E-1	5E-4	1E-4	9E-2	7E-3	8,6E-1	9,4E-1	1,4E-1	4E-2

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Legenda: (X) tendência crescente, (-X) tendência decrescente e (0) não apresenta tendência.

5.1.8 Tendência semestral da ETo por (t de student)

Na sequência, serão mostrados os resultados da ETo estimada pelos métodos de

Penman-Monteith FAO56 (Pen_T12) e Hargreaves (Hag_T12), além de Penman-Monteith FAO56 considerando a velocidade do vento como constante de 2m/s (P_2ms_T12).

Considerando os resultados por (Pen_T12), para o 1º e 2º semestres (Tabela 12), o teste provou que não há evidências estatísticas suficientes para se rejeitar a hipótese nula, ou seja, a ETo não apresenta tendência crescente ou decrescente, ainda que algumas variáveis apresentaram tendência de aumento (conforme Tabela 9).

Uma explicação para isto residiria no fato de que as variáveis umidade relativa do ar e velocidade do vento, uma vez não apresentando tendência crescente, findaram influenciando negativamente a estimativa da ETo.

Quando analisadas as 12_Estações pelo método de Hargreaves-Samani (Hag_T12), em função das tendências crescentes nas temperaturas, o teste de hipótese apontou que há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula, mas apenas para o 2º semestre, ou seja: a ETo apresentou tendência crescente significativa apenas no 2º semestre, pois $p < \alpha$, o que pode ser visto pela análise das 12_Estações (Tabela 12). No 1º semestre, mantiveram-se com características normais (Tabela 12).

Quando analisadas as 3_Estações, o teste apontou que não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula, ou seja: a ETo mantém-se dentro da normalidade (Tabela 13), pois $p < \alpha$, sendo p apresentando valores bastante elevados. Isso pode ser explicado em razão da influência da baixa frequência de dados nas séries. Logo, quando aplicado o teste numa condição de maior “solidez” nos dados, ele apontou comportamento diferente da ETo (Tabela 13), mostrando-se a grande importância da interpretação e tratamento dos dados, a fim de evitar conclusões antecipadas.

Tabela 12 – Teste de hipótese aplicado a ETo semestral estimada pelos métodos: (Pen_T12), (Hag_T12) e (P_2ms_T12) para as 12_Estações.

Métodos	Semestres			
	1º Sem	p	2º Sem	p
12_estações (Pen_T12)	0	0,732	0	0,184
(Hag_T12)	0	0,315	X	0,042
(P_2ms_T12)	0	0,508	X	0,048

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Legenda: (X) tendência crescente, (-X) tendência decrescente e (0) não apresenta tendência.

Agora, quando foi considerada a velocidade do vento constante de 2m/s, o teste de hipótese verificou uma tendência de aumento da ETo no 2º semestre, sendo reforçado com $p < \alpha$, em consequência desta justa velocidade constante (Tabela 12). Esse aumento poderia ser

explicado pelo fato de que se manteve a velocidade constante para o período onde o teste de hipótese mostrou tendência decrescente (Tabela 9), contribuindo, com isso, para o aumento da ETo.

Mas, quando se mantém uma análise mais robusta, do grupo das 3_Estações, é possível concluir de forma diferente e mais coerente, como mostrado na Tabela 13, pois ficou evidente que, quando são preservadas as características originais das variáveis, como exemplo a velocidade do vento, a informação obtida melhor condiz com a realidade, reforçando que uma melhoria na densidade dos dados induz a uma melhoria nas conclusões, pois, mesmo o teste indicando tendência decrescente para o vento, como mostra a Tabela 9, essa variável apresenta, na maior parte do ano, uma velocidade média acima de 2 m/s (Figura 24).

Tabela 13 - Teste de hipótese aplicado a ETo semestral estimada pelos métodos: (Pen_T3), (Hag_T3) e (P_2ms_T3) para o grupo das 3_Estações.

Métodos	Semestres				
	3_estações	1º Sem	p	2º Sem	p
(Pen_T3)		0	0,914	0	0,877
(Hag_T3)		0	0,907	0	0,612
(P_2ms_T3)		0	0,939	0	0,821

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Legenda: (X) tendência crescente, (-X) tendência decrescente e (0) não apresenta tendência.

Portanto, uma vez que (Pen_T3) já informaria que a ETo não apresentou tendência crescente no 2º semestre, o resultado, ao se considerar a velocidade do vento constante de 2m/s não acarretaria crescimento da ETo, uma vez que o vento no 2º semestre, apesar do teste não apontar tendência crescente, e, sim, de diminuição (Tabela 9), nesse semestre a velocidade do vento manteve-se, em média, acima de 2m/s. Isto inviabilizaria a elevação da ETo, diferentemente do mostrado na Tabela 12, reforçando a importância da análise criteriosa ao se trabalhar com séries de baixa densidade de dados.

5.1.9 Tendência anual da ETo por (t de student)

Aplicando o teste de hipótese para a ETo no período anual para o grupo das 12_Estações (Tabela 9), foi possível verificar que, devido à quantidade de falhas, o ano de 1987 apresentou apenas 5 meses com dados (Janeiro a Maio), impactando diretamente no resultado do teste de hipótese, uma vez que, permanecendo nesta condição, não houve evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula, já que $p > \alpha$, visto em nenhum dos métodos

descritos na Tabela 14.

Embora com a retirada deste ano da série, o teste indicou tendência crescente significativa da ETo ao longo dos anos, estimada pelos métodos de Hargreaves-Samani e Penman-Monteith FAO56 considerando a velocidade do vento de 2m/s (Tabela 14), reforçando, no entanto, que a quantidade de falhas nas séries pode, de fato, impactar seriamente os resultados.

Tabela 14 - Teste de hipótese aplicado a ETo anual estimada pelos métodos: (Pen_T12), (Hag_T12) e (P_2ms_T12) para ao grupo das 12_Estações.

Período	Métodos		
	(Pen_T12)	(Hag_T12)	(P_2ms_T12)
1976 - 2005			
com 1987	0	0	0
p	0,245	0,126	0,150
sem 1987	0	X	X
p	0,171	0,013	0,044

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Legenda: (X) tendência crescente, (-X) tendência decrescente e (0) não apresenta tendência.

Já quando a mesma análise foi realizada com a série do grupo das 3_Estações (Tabela 15), apesar de apresentar três anos com dados variando entre três e cinco meses, a ausência ou permanência destes dados na série não impactou o resultado do teste de hipótese em termos de indicar tendência na ETo.

A explicação para esse comportamento do teste pode-se entender como sendo porque, como as 3_Estações possuem um maior número de dados referentes a cada mês, mantendo, com isso, uma baixa variabilidade (melhor regularidade nos dados) mês a mês, conseqüentemente, ao longo do ano, fez com que a influência de meses com poucos dados, não se tornasse significativa diante da análise tendenciosa.

Tabela 15 – Teste de hipótese aplicado a ETo anual estimada pelos métodos: (Pen_T3), (Hag_T3) e (P_2ms_T3) para o grupo das 3_Estações.

Período	Métodos		
	(Pen_T3)	(Hag_T3)	(P_2ms_T3)
1976 - 2005			
com 1987, 2000, 2001	0	0	0
p	0,345	0,3273	0,377
sem 1987, 2000, 2001	0	0	0
p	0,788	0,598	0,529

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Legenda: (X) tendência crescente, (-X) tendência decrescente e (0) não apresenta tendência.

5.1.10 Tendência semestral das variáveis: Thiessen das estações por (Mann-Kendall sen)

Foi aplicado o teste de estatístico não-paramétrico de Mann-Kendall (MK), para detectar tendências estatisticamente significativas e a curvatura de Sen, para avaliar a magnitude dessas tendências. Por conseguinte, na variável analisada, quando não apresentar tendência por MK, ou seja, $MK = (0)$, sua magnitude não será apresentada nas tabelas, sendo representada pelo asterisco (*). Analisando às 12_Estações, em relação às temperaturas, foi detectado que no 1º semestre apenas a temperatura máxima (TMAX) não apresentou tendência, uma vez que $p > \alpha$, enquanto as demais apresentaram tendência crescente significativa, pois $p < \alpha$ e com magnitudes determinadas pelos valores da Curvatura de Sen, variando de 0,032 a 0,074 °C por semestre. Com relação a umidade relativa do ar (UR) apenas no 2º semestre o teste de Mann-Kendall indicou tendência decrescente significativa na ordem de 0,144 % por semestre. O mesmo podendo ser visto com o vento para o 1º semestre, com redução significativa de 0,021 m/s por ano, enquanto no 2º semestre, apresentou comportamento dentro da normalidade, igualmente visto para a UR no 1º semestre, pois $p > \alpha$ (Tabela 16).

Tabela 16 – Teste de tendência de Mann-Kendall e Curvatura de Sen aplicado ao Thiessen das variáveis: Temperatura máxima, mínima e média, umidade relativa do ar (UR) e vento, para as 12_Estações.

Variáveis	TMAX		TMIN		TMED		UR		VENTO	
	1º Sem	2º Sem								
MK	0	X	X	X	X	X	0	-X	-X	0
Sen	*	0,074	0,032	0,0412	0,041	0,060	*	-0,144	-0,021	*
p	0,111	0,015	0,026	0,003	0,050	0,002	0,895	0,031	0,034	0,051

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Legenda: (X) tendência crescente, (-X) tendência decrescente e (0) não apresenta tendência, (MK) Mann-Kendall; (Sen) Curvatura de Sen.

Quando aplicado MK e Sen na análise das 3_Estações, apenas a temperatura mínima (Tmin) e temperatura média (Tmed) apresentaram tendência crescente significativa para os 2 semestres, já que $p < \alpha$, e variando em magnitude, um crescimento de 0,040 a 0,049 °C por semestre. A temperatura máxima (Tmax), umidade relativa do ar (UR) não apresentaram tendências em nenhum dos semestres, logo apresentaram valores de pois $p > \alpha$.

Já a o vento, mantém-se dentro do padrão normal no 1º semestre e com tendência decrescente no 2º semestre, com $p = 0,030 < \alpha = 0,05$, com redução na ordem de 0,021 m/s por semestre (Tabela 17).

Tabela 17 – Teste de tendência de Mann-Kendall e Curvatura de Sen aplicado ao Thiessen das variáveis: Temperatura máxima, mínima e média, umidade relativa do ar (UR) e vento, para as 3_Estações.

Variáveis	TMAX		TMIN		TMED		UR		VENTO	
	1° Sem	2° Sem								
MK	0	0	X	X	X	X	0	0	0	-X
Sen	*	*	0,038	0,049	0,024	0,040	*	*	*	-0,021
p	0,353	0,123	0,005	7E-4	0,038	0,014	0,767	0,739	0,086	0,030

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Legenda: (X) tendência crescente, (-X) tendência decrescente e (0) não apresenta tendência, (MK) Mann-Kendall; (Sen) Curvatura de Sen.

5.1.11 Tendência semestral da ETo por (Mann-Kendall sen)

Na sequência visualizaremos os resultados da ETo estimada pelos métodos de Penman-Monteith FAO56 (Pen_T12) e Hargreaves-Samani (Hag_T12), além de Penman-Monteith FAO56 considerando a velocidade do vento como constante de 2m/s (P_2ms_T12). Considerando os resultados por (Pen_T12), para o 1° e 2° semestres (Tabela 18) o teste de MK não indicou tendência, pois $p > \alpha$, o mesmo comportamento pode ser observado na ETo por (Hag_T12).

No entanto, quando aplicado MK e curvatura de Sen na ETo estimada por (P_2ms), percebeu-se que apenas o 2° semestre apresentou tendência crescente significativa, uma vez que $p < \alpha$, e de acordo com a curvatura de Sen, numa magnitude de 0,4205 mm por semestre, ou correspondente a um acréscimo de aproximadamente 12 mm em 28 anos (Tabela 18).

Uma explicação, para essa tendência crescente, estaria nas temperaturas, pois MK apontou crescimento significativo, (Tabela 16) e com influência do vento, mesmo não apresentando tendência, mantê-lo constante, leva a contribuir para elevação da ETo, reforçando a importância do seu papel no processo evapotranspirativo.

Para tanto, como forma de confirmação dessa explicação, ao analisar-se a ETo por (Hag_T12), que é função apenas da temperatura, percebeu-se que a ETo não apresentou tendência, mantendo-se dentro da normalidade no 2° semestre (Tabela 18).

Quando analisado um maior número de dados em cada estação, apesar de apenas três, 3_Estações, o teste MK apontou que não há tendência crescente e/ou decrescente em nenhum dos métodos adotados nos dois semestres analisados, devido $p > \alpha$, assim, assinalando um comportamento diferente da ETo (Tabela 19). Assim sendo, quanto maior a densidade dos dados, melhor a informação obtida que condiz com a realidade, implicando à melhora nas conclusões.

Tabela 18 – Teste de tendência de Mann-Kendall e Curvatura de Sen aplicado a ETo semestral estimada pelos métodos: (Pen_T12); (Hag_T12) e (P_2ms_T12) para as 12_Estações.

Métodos	12_estações					
	Semestres					
	1º Sem			2º Sem		
	MK	Sen	p	MK	Sen	p
(Pen_T12)	0	*	0,7784	0	*	0,1856
(Hag_T12)	0	*	0,1486	0	*	0,1186
(P_2ms_T12)	0	*	0,3580	X	0,4205	0,0135

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Legenda: (X) tendência crescente, (-X) tendência decrescente e (0) não apresenta tendência, (MK) Mann-Kendall; (Sen) Curvatura de Sen.

Tabela 19 – Teste de tendência de Mann-Kendall e Curvatura de Sen aplicado a ETo semestral estimada pelos métodos: (Pen_T3); (Hag_T3) e (P_2ms_T3) para as 3_Estações.

Métodos	3_estações					
	Semestres					
	1º Sem			2º Sem		
	MK	Sen	p	MK	Sen	p
(Pen_T3)	0	*	0,7973	0	*	0,9667
(Hag_T3)	0	*	0,7973	0	*	0,1962
(P_2ms_T3)	0	*	0,8589	0	*	0,8675

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Legenda: (X) tendência crescente, (-X) tendência decrescente e (0) não apresenta tendência, (MK) Mann-Kendall; (Sen) Curvatura de Sen.

Portanto, as conclusões podem sofrer variações, uma vez que dependem da forma de interpretação e de tratamento da série de dados. Sendo assim, torna-se imprescindível o acompanhamento cauteloso da disposição da série de dados, além da interpretação e tratamento dos dados, afim de atenuar conclusões antecipadas.

5.1.12 Tendência anual da ETo por (Mann-Kendall sen)

Aplicando o teste de MK e Curvatura de Sen para a ETo no período anual nas 12_Estações (Tabela 9), foi possível verificar que, apenas (Pen_T12) manteve-se dentro da normalidade, não apresentando tendência, uma vez que $p = 0,1186$ foi maior que $\alpha = 0,05$. Já (Hag_T12) e (P_2ms_T12) indicaram tendência crescente significativa, pois $p < \alpha$, e com magnitude de 5,51 e 5,32 mm por ano (Tabela 20).

Já quando a mesma análise foi realizada com a série nas 3_Estações (Tabela 21), o teste de MK e Sen não apresentaram tendência crescente e/ou decrescente significativa na ETo a nível anual, indicando que as possíveis variações nas variáveis e consequentemente na ETo, não impactarão a ETo a nível anual, ou seja, a ETo no período de 1976-2005, segundo os dados analisados, não apresentou tendência crescente, mantendo-se dentro da normalidade.

No entanto, torna-se imprescindível ressaltar que o comportamento dos resultados obtidos a partir do teste de MK e Sen, ou teste de hipóteses, referentes tanto para as 3_Estações, quanto para as 12_Estações, podem apresentar resultados diferentes, uma vez que, com apenas 3_Estações que dispunham uma melhor série de dados, os testes mostraram resultados significativamente superior quando comparado à análise das 12_Estações.

Tabela 20 – Teste de tendência de Mann-Kendall e Curvatura de Sen aplicado a ETo anual estimada pelos métodos: (Pen_T12); (Hag_T12) e (P_2ms_T12) para as 12_Estações.

Métodos	Anual		
	MK	Sen	p
(Pen_T12)	0	*	0,1186
(Hag_T12)	X	5,5150	0,0108
(P_2ms_T12)	X	5,3212	0,0208

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Legenda: (X) tendência crescente, (-X) tendência decrescente e (0) não apresenta tendência, (MK) Mann-Kendall; (Sen) Curvatura de Sen.

Tabela 21 – Teste de tendência de Mann-Kendall e Curvatura de Sen aplicado a ETo anual estimada pelos métodos: (Pen_T3); (Hag_T3) e (P_2ms_T3) para as 3_Estações.

Métodos	Anual		
	MK	Sen	p
(Pen_T3)	0	*	0,5666
(Hag_T3)	0	*	0,0939
(P_2ms_T3)	0	*	0,2517

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Legenda: (X) tendência crescente, (-X) tendência decrescente e (0) não apresenta tendência, (MK) Mann-Kendall; (Sen) Curvatura de Sen,

Diante de toda a discussão acima apresentada, com relação à representatividade da ETo para o Estado do Ceará, em função da consistência dos dados e dos bons resultados apresentados, foi adotado como ETo de referência para o clima presente aquela estimada com variáveis representada pelas 3_Estações.

Portanto, a partir dessa discussão, para fins de análise da ETo no cenário de mudanças climáticas com o clima presente, foi adotado P_(OBS) para o método de Penman-Monteith FAO56 (*antes chamado (Pen_T3)*), H_(OBS) para Hargreaves-Samani (*antes chamado (Hag_T3)*) e P_2ms para método de Penman-Monteith FAO56 mantendo a velocidade do vento constante em 2m/s (*antes chamado (P_2ms_T3)*).

5.2 Comparação entre Penman-Monteith FAO56 e Hargreaves-Samani, a partir de dados observados e dos Modelos Climáticos Globais

5.2.1 Análise da Evapotranspiração (ET_o) Observada no Período histórico (1976 – 2005)

As análises a seguir serão efetuadas baseando-se no comportamento médio da ET_o mensal (mm/mês) e anual (mm/ano). Para verificar a dispersão e/ou variabilidade da ET_o e medidas de tendência central, serão utilizados gráficos do tipo *Boxplot*. Gráficos de linha e *Boxplot* serão aplicados na análise do período sazonal ou semestral, sendo o 1º semestre (Janeiro a Junho) considerado como sendo o período mais úmido, e 2º semestre (Julho a Dezembro), como o período mais seco da região. As médias, tanto para período anual quanto para o semestral, serão analisadas através de gráficos de linha.

Os resultados da ET_o mostrados nos *boxplot*, com o advento dos dados modelados, serão visualizados tanto a ET_o obtida com dados brutos (ou seja, sem correção) e a ET_o corrigida pela aplicação da distribuição Gama.

Na análise das figuras (gráficos de linhas e *boxplots*) nos resultados, fez-se a opção por utilizar como nomenclatura padrão para o método de Hargreaves-Samani apenas o nome “Hargreaves”, representado pela letra (H), com a sigla H_(OBS) para os dados observados, e para os dados modelados, (H_“sigla do modelo”)⁴.

Para o método padrão Penman-Monteith FAO56, apenas o nome “Penman”, sendo representado pela letra (P), com a sigla P_(OBS) para os dados observados, e para os dados modelados, (P_“sigla do modelo”). Quando a velocidade do vento foi considerada constante de 2m/s adotou-se, para os dados observados, a sigla P_2ms, para os dados modelados (P_“sigla do modelo”_2ms).

5.2.2 Análise da ET_o mensal

Ao verificar o comportamento da ET_o acumulado no período mensal, para o período chuvoso (Figura 23), percebeu-se que os dois métodos P_(OBS) e P_2ms apresentaram a mesma performance. Quando a análise foi estendida para todo o 1º semestre, o método de Hargreaves H_(OBS) superestimou levemente a ET_o, nos meses de Fevereiro a Maio, com aproximadamente 5%, 11%, 10% e 7%, respectivamente, quando comparada ao método

⁴ A título de exemplo: (H_Can), quer dizer método Hargreaves-Samani com dados do modelo CanESM2. (P_Can), método Penman-Monteith FAO56 com dados do modelo CanESM2. (P_Can_2ms), método Penman-Monteith FAO56 com velocidade constante de 2m/s com dados brutos do modelo CanESM2.

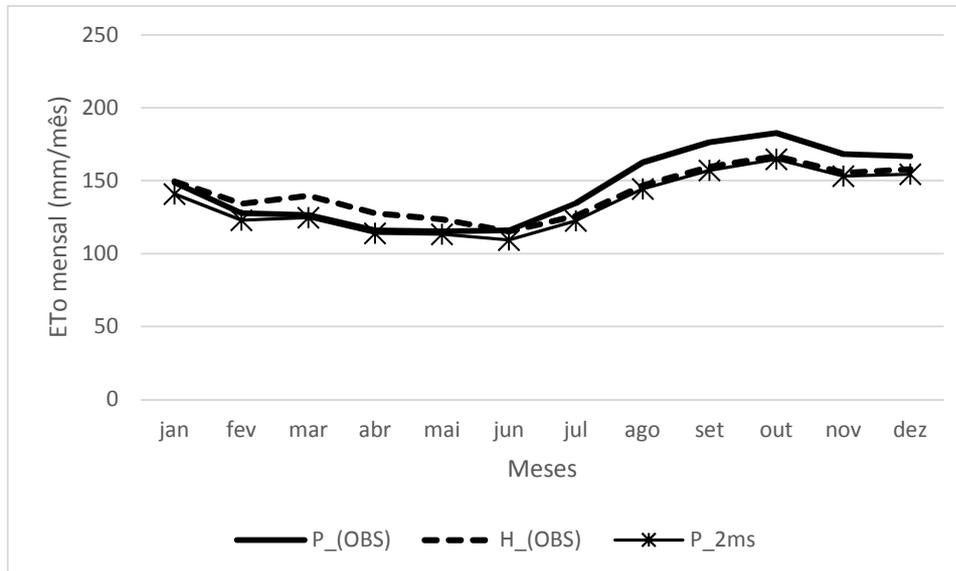
P_(OBS).

Essa superestimativa é pouco significativa quando se compara a trabalhos na literatura que relatam que o método de Hargreaves-Samani superestima o método padrão, FAO56, dentre eles: Araújo *et al.* (2007), que estimou a evapotranspiração potencial mensal por diferentes métodos, incluindo o Hargreaves-Samani, na região de Boa Vista, Roraima, Brasil, concluindo que o mesmo pode ser usado, mas com a ressalva de superestimar os valores de ETo ao longo do ano.

Fernandes *et al.* (2011) avaliaram, calibraram e validaram o método de estimativa da ETo de Hargreaves-Samani para o Município de Manaus, Estado do Amazonas, tanto para a calibração quanto para a validação, havendo uma tendência em superestimar os valores de ETo em relação aos valores obtidos pelo método padrão Penman-Monteith FAO56.

Para Allen *et al.* (1989), a determinação da evapotranspiração potencial utilizando métodos combinados tende a superestimar a ETo, um pouco em regiões áridas e muito em regiões úmidas.

Figura 23 - Média mensal da ETo acumulada no período de 1976-2005, com dados observados.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Continuando a análise, a maioria dos meses, e principalmente no 2º semestre, o método H_(OBS) subestimou o método padrão P_(OBS) nos meses de Julho a Dezembro, variando entre 5,19% a aproximadamente 11,20%, respectivamente. Concordando com Silva *et al.* (2015), que constataram que o método de Hargreaves-Samani subestimava o método de Penman-Monteith FAO56 em algumas localidades do Estado do Ceará, como em Campos

Sales, uma leve subestimativa da ETo, de apenas 0,63%, em Fortaleza, Iguatu e Quixeramobim, respectivamente da ordem de 10,81, 3,09 e 7,91%, foi encontrada. Lacerda e Turco (2015), em seu trabalho realizado em Uberlândia, Estado de Minas Gerais, também reportaram subestimativa da ETo diária por Hargreaves-Samani da ordem de 11% em relação ao método padrão de PM_FAO56.

Adotando a velocidade do vento como constante de 2m/s para o cálculo da ETo mensal pelo método de Penman-Monteith FAO56 P_2ms, e por conseguinte, comparando-a a P_(OBS), ficou evidente que P_2ms subestimou a ETo mensal na maioria dos meses do ano, principalmente no 2º semestre.

Com a aplicação o teste de hipótese da diferença de médias, foi possível perceber que, no 1º semestre, P_2ms subestimou P_(OBS), a estatística do teste indicou que não é possível afirmar que existe diferença significativa as duas médias de P_2ms e P_(OBS). O mesmo pôde ser observado quando aplicado o teste de diferença de médias, entre H_(OBS) e P_2ms no 2º semestre, reforçando que, mesmo as encontradas por P_2ms mantiveram-se praticamente as mesmas proporções dos resultados encontrados H_(OBS), não é possível afirmar estatisticamente que existe diferença significativa.

A diferença entre as médias de P_(OBS) e P_2ms, variou de 1,38% a 5,63% no 1º semestre, enquanto diferença entre as médias de H_(OBS) e P_2ms, variou de 1,37% a 2,72 % no 2º semestre, (Figura 23).

Com a aplicação do teste de hipótese da diferença de médias, notou-se que para o 1º semestre, H_(OBS) superestimou P_(OBS) de Fevereiro a Maio, porém essa diferença entre as médias só pôde ser considerada estatisticamente significativa, quando apresentou um percentual acima de 7%, ou seja, entre os meses de Março, Abril e Maio. Enquanto para o 2º semestre, H_(OBS) e P_2ms subestimaram P_(OBS) e com a aplicação do teste, verificou-se que a diferença entre as médias foi considerada significativa quando maior que 6%.

Silva *et al.* (2013), analisando a influência de diferentes valores fixos da velocidade do vento, de 1,0; 1,5; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5 e 5 m/s na estimativa da ETo obtida pelo método de Penman-Monteith FAO56, concluíram que o melhor desempenho foi encontrado com os valores fixos de velocidade do vento de 2,0 e 2,5 m/s, porém superestimando a ETo com dados completos em apenas 1,31% (0,10 mm/dia) e 6,83% (0,30 mm/dia), respectivamente.

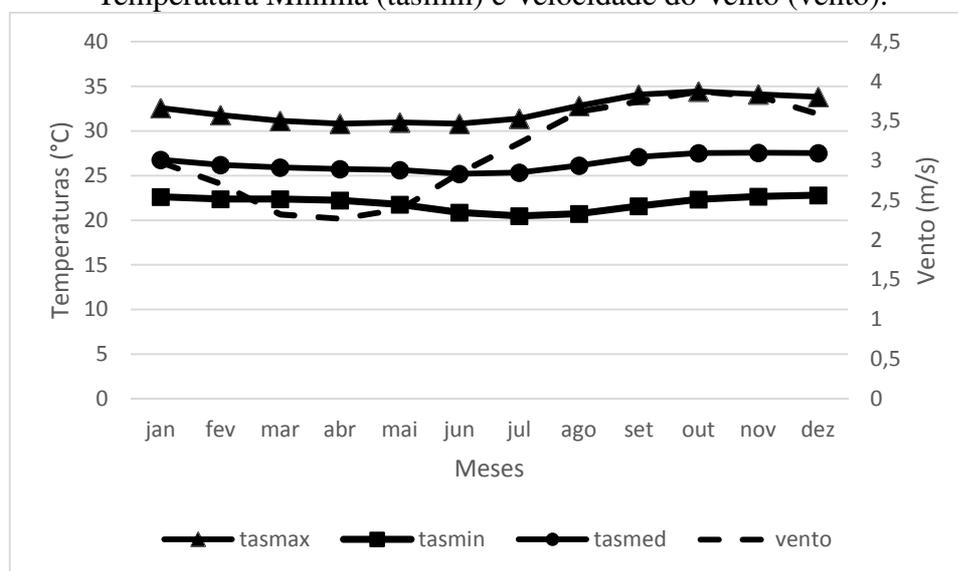
Outros autores, como Carvalho *et al.* (2013), utilizando o método de Penman-Monteith FAO56 como método padrão na estimativa de ETo, comparou-o com o método Penman-Monteith Simplificado, utilizando apenas dados de temperatura máxima e mínima e velocidade do vento constante de 2m/s, para a região de Lavras, Minas Gerais, Brasil,

concluindo que o método alternativo simplificado teve uma tendência de superestimar o método padrão PM_FAO56.

Alencar *et al.* (2015), realizando um estudo de estimativa da evapotranspiração potencial ETo padrão FAO com ausência de alguns dados climáticos, para o Estado de Minas Gerais, e utilizando dados diários no período de 2000 a 2005, adotaram o valor de 2m/s para a velocidade do vento e também verificaram que o método de Penman-Monteith FAO56 tendeu a superestimar a ETo obtida com os dados completos em 0,14 mm/dia, em média, para todas as localidades. Uma explicação, segundo estes autores, seria em razão da velocidade média do vento na localidade ser inferior ao valor de 2m/s.

Diante desse contexto, com diversos trabalhos mostrando uma superestimativa da ETo quando considerada a velocidade constante de 2m/s para essas regiões analisadas, pode-se deduzir que o vento nessas regiões apresenta velocidade média inferior a 2m/s, diferentemente do Ceará, onde a velocidade média do vento mantém-se superior a 2m/s durante todo o ano, principalmente no período de Julho a Dezembro, com valores médios acima de 3 m/s, tendo seu maior pico no mês de Outubro, com cerca de 4 m/s (Figura 24).

Figura 24 – Climatologia das variáveis envolvidas diretamente no processo de evapotranspiração: Temperatura Máxima (tasmax); Temperatura Média (tasmed); Temperatura Mínima (tasmin) e Velocidade do Vento (vento).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Outra informação relevante a ser pontuada reside no fato de que, em regiões onde a velocidade média do vento é baixa (menor que 2m/s), essa variável apresenta pouca influência no processo evapotranspirativo.

Portanto, pode-se concluir que, tanto o método de Hargreaves-Samani, quanto

P_{2ms} podem ser usados com eficiência na estimativa da ETo no 2º semestre (Figura 23). Para o período de Janeiro a Junho, qualquer dos dois métodos analisados podem ser adotados na estimativa da ETo, apesar de H_(OBS) apresentar uma pequena superestimativa, por volta de 6 a aproximadamente 14 mm/mês em Fevereiro, Março, Abril e Maio.

Logo, apesar da diferença nos valores estimados da ETo para o período de Julho a Dezembro, a ETo pode ser estimada por ambos os métodos, com a ressalva de que, para o planejamento do sistema de irrigação, dependendo da cultura, essa diferença de menos de 10% entre o método de Hargreaves-Samani H_(OBS) e o PM_FAO56 P_(OBS) requer maior atenção no controle de liberação da água utilizada na irrigação. Pois, aplicado o teste de hipótese da diferença de médias, nesse período, um percentual já a partir de 6,4%, torna-se significativo, reforçando a informação de que medidas cautelosas devem ser tomadas para o controle e liberação da água. Já para o setor de abastecimento humano e industrial, essa diferença é provavelmente bem menos impactante à gestão dos recursos hídricos. Uma informação relevante deve ser ressaltada, pois toda a análise deste trabalho limitou-se à média climatológica, ou seja, dentro do período climatológico (30 anos), as diferenças da ETo de ano para ano podem apresentar-se maiores e com isso, impactando o sistema de gestão dos recursos hídricos.

5.2.3 *Análise da ETo anual*

Quando a análise da ETo na escala anual foi estendida (Figura 25), foi possível notar que, devido ao grande número de falhas observado nas séries, os anos de 1987, 1988, 2000 e 2001 foram diretamente afetados. O ano de 1988 foi o único a não apresentar dados. Os demais apresentaram alguns meses com dados, porém, não representando o acumulado anual, e por este motivo, foram retirados da série analisada.

A evapotranspiração anual apresentou alguns picos na série, como os anos de 1983, 1993, 1998, estando estes possivelmente sofrendo grande influência dos eventos de El Niño. No entanto, pode-se deduzir que a ETo anual não apresentou aumento até 2005, e que, conforme visto anteriormente, quando submetido à aplicação do teste de *t de student*, não foi detectada tendência crescente na ETo a nível anual.

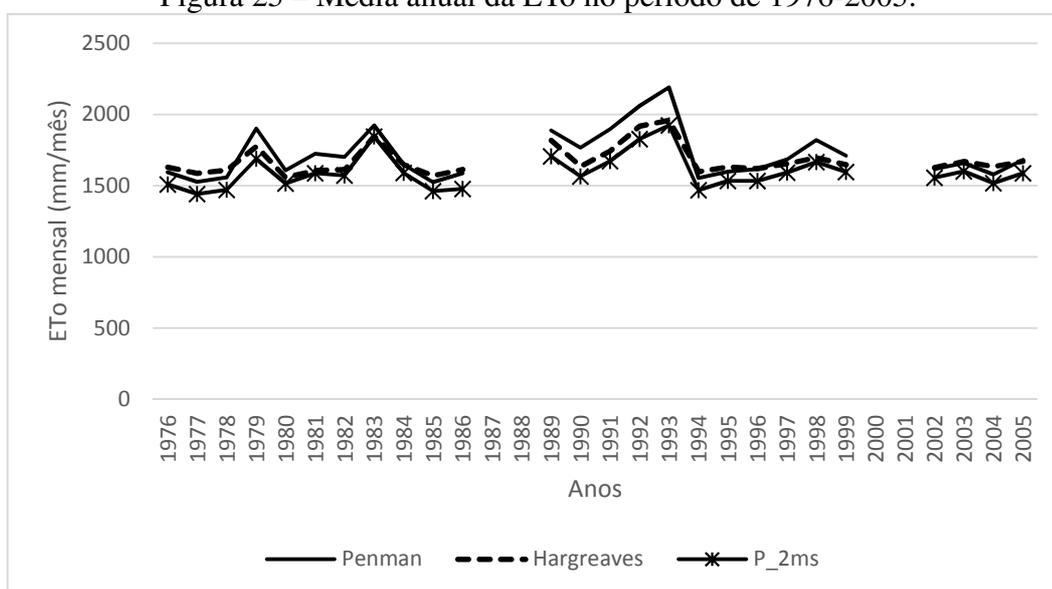
A ETo estimada por Penman-Monteith FAO56 P_(OBS) se manteve sempre maior em praticamente todos os anos analisados. Diferentemente de quando foi adotada a velocidade constante do vento (2m/s), situação em que ela se manteve sempre abaixo tanto de P_(OBS) quanto de Hargreaves H_(OBS), indicando que a variável vento, quando mantida constante,

pode trazer, a nível anual, uma redução da ETo, quando, na verdade, essa informação não condiz com a real situação da região de estudo, pois que a mesma apresenta elevadas temperaturas e ventos bem acima dos 2 m/s, principalmente no 2º semestre.

A influência da tendência no acréscimo da temperatura, vista pelo teste de hipótese, torna-se visível em alguns anos, devido à ETo estimada por Hargreaves-Samani apresentar-se ligeiramente maior que a estimada por P_(OBS). Este é o caso de anos como: 1976, 1977, 1978, 1985, 1986, 1994, 2002, 2003 e 2004, porém, como mostrado anteriormente, o vento não indicou tendência de aumento, o que leva a crer que estes anos onde a ETo resultou maior por Hargreaves-Samani H_(OBS) que por Penman-Monteith FAO56 P_(OBS) podem estar relacionados aos dados faltantes.

Outra explicação estaria na maior contribuição da ETo no 1º semestre, uma vez que seus acumulados são superiores ao P_(OBS), implicando, nesses anos, uma elevação na ETo, e podem estar relacionados a, por exemplo, períodos mais secos, com temperaturas mais elevadas, única variável para estimar ETo por Hargreaves-Samani.

Figura 25 – Média anual da ETo no período de 1976-2005.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quando a ETo estimada com velocidade constante de 2 m/s foi analisada, percebeu-se que o acumulado anual permaneceu abaixo de P_(OBS) e H_(OBS). No entanto, convém ressaltar que a velocidade do vento, quando acima de 2m/s, possui um papel significativo no processo de evapotranspiração, porém, quando mantida abaixo desse valor não apresenta contribuição significativa para a elevação da ETo (Figura 25).

Assim sendo, na ausência dessa variável velocidade do vento, a ETo pode ser

estimada com segurança pelo método de Hargreaves-Samani, pois, tal como mostrado, a variação nas temperaturas afeta diretamente os quantitativos da ETo ao longo do ano. Nas análises realizadas, os anos de 1987, 2000 e 2001 apresentaram acumulados variando de 451,19 a cerca de 772 mm/ano, valores que estão relacionados ao número de falhas ao longo do ano. Em consequência, ao somar todos os meses, só foi possível encontrar esse total.

A seguir, serão mostrados os resultados da variabilidade da ETo estimada com dados observados e utilizando os três métodos empregados na presente análise.

5.2.4 *Boxplot da ETo mensal com dados observados*

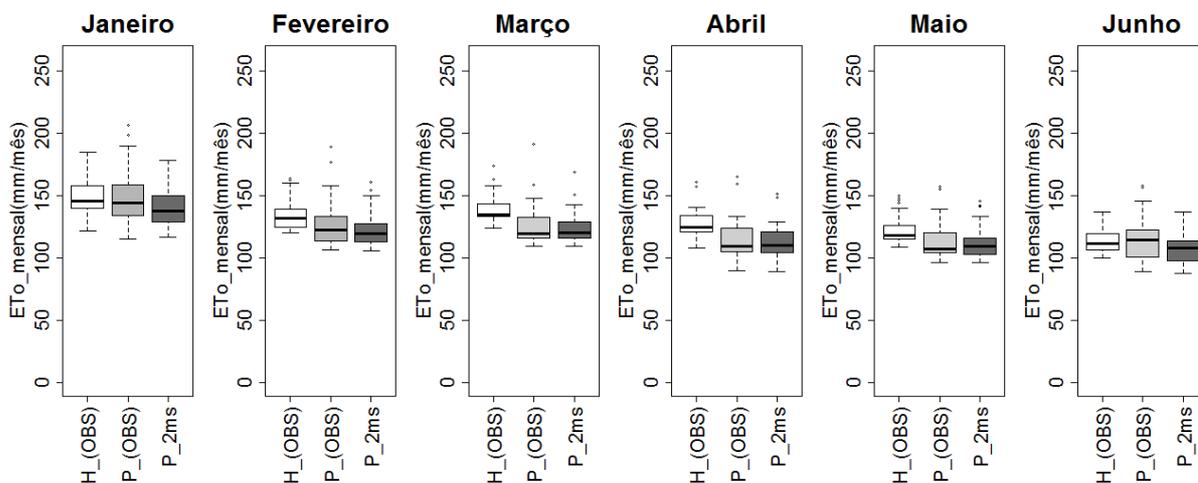
Na análise do *Boxplot*, a medida de tendência central (mediana), representada por uma linha horizontal dentro da caixa, também conhecida como 2º quartil, tende a deslocar-se para o(s) quartil(s) que apresenta(m) menor dispersão e/ou variabilidade, seja para os valores máximos ou para os mínimos. Essa tendência de deslocamento ocorre devido à assimetria nos dados – quanto mais assimétricos, mais a mediana tenderá a um dos extremos. Quando os dados possuem uniformidade, a mediana praticamente mantém sua posição no centro da “caixa”.

Considerando o período histórico de dados observados, foi possível perceber que, quando se mantém a velocidade do vento constante em 2m/s, os valores de ETo se mantêm subestimando os dois métodos P_(OBS) e H_(OBS), desde o período chuvoso (Janeiro a Abril) estendendo-se até Junho. Uma possível explicação, seria a influência da redução na velocidade do vento e na diminuição das temperaturas máxima e média durante esse período, como mostrado na (Figura 24).

O posicionamento da mediana nos meses mais chuvosos (Março a Maio) mostra a maior assimetria da ETo nesse período, consequentemente ocasionado pela variação das temperaturas, visto pelo método de H_(OBS), e das outras variáveis, pelo método de P_(OBS) e P_2ms. Com isso, verificou-se a assimetria da ETo nesse período (Figura 26).

Já no 2º semestre (período mais seco), as temperaturas praticamente se mantiveram com baixa variabilidade, o que pode ser visto pela simetria no posicionamento da mediana, para os meses de Novembro e Dezembro. Ocorreu algo semelhante para P_2ms, pois nesse referido período, a velocidade do vento tende a aumentar, e mantê-la constante tende a reduzir a ETo. Todavia, para a ETo estimada por P_(OBS), as variações nas variáveis como velocidade do vento e umidade relativa do ar tornam-se mais expressivas, impactando diretamente na ETo do período, como pode ser visto pelo posicionamento da mediana na Figura 27.

Figura 26 – *Boxplot* da ETo mensal no período de 1976 – 2005, estimada pelos métodos de Penman (P), Hargreaves (H) e Penman (P_2ms) com velocidade do vento constante de 2m/s, para o 1º semestre.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Considerando o método de P_(OBS) como padrão, e comparando-o ao P_2ms, pôde-se verificar que, com a diminuição da velocidade dos ventos no período de Janeiro a Junho (Figura 24), a ETo de P_(OBS) resultou praticamente com mesmo valor que a estimada por P_2ms, todavia, esse aumento ficou evidente a partir de Julho (ver Figura 27), influenciado pelo incremento das demais variáveis.

A ETo por P_(OBS) sofreu grande variação positiva nos acumulados mensais, devido à forte variação da velocidade do vento, que no 2º semestre tende a aumentar (Figura 24), influenciando nos totais da ETo, principalmente no mês de Outubro, onde foi registrado valor máximo de aproximadamente 217 mm/mês (Figura 27).

Uma informação importante refere-se ao comportamento da ETo nos meses de Março a Maio pelo método de Hargreaves-Samani, e de Fevereiro a Maio, pelo método de Penman-Monteith FAO56. Para o método de Hargreaves-Samani, a assimetria nos dados tornou-se evidente devido à variação na variável temperatura, o mesmo podendo ser relatado para o método de Penman-Monteith FAO56.

Essa assimetria positiva é causada pela variação nas variáveis, e consequentemente, pela influência da alta nebulosidade, menor incidência de radiação e das precipitações mais acentuadas e comuns nesse período. Portanto, a mediana (ou metade dos dados) tenderá aos extremos mais baixos (Figura 26).

Diferentemente dos meses de Novembro e Dezembro de H_(OBS) e de Novembro de P_(OBS), onde as variáveis temperaturas e velocidade do vento registram pouca variação, mostrando uma simetria nos acumulados da ETo, e refletindo numa baixa dispersão nos

acumulados (Figura 27), tornando-se, assim, uma informação importante no que diz respeito ao monitoramento e à liberação da vazão dos reservatórios para os diversos fins, auxiliando diretamente na gestão dos recursos hídricos. Portanto, pode-se concluir preliminarmente que, quanto menor a dispersão da ETo, melhor a gestão dos recursos hídricos.

Analisando o método de H_(OBS) comparando a P_(OBS), notou-se que, como a temperatura não varia para sua elevação, ou seja, manteve-se mais baixa que o normal e com pouca variação entre os meses de Janeiro a Junho (Figura 26), principalmente no período mais chuvoso (Janeiro a Abril), a estimativa da ETo por H_(OBS) apresentou pouca variação quando comparado a P_(OBS), devido ao fato de esse método ser função diretamente da temperatura, com seus valores de ETo um pouco acima do P_(OBS) nos meses de Fevereiro, Março, Abril e Maio (Figura 26).

Observou-se também que, mesmo nos meses mais secos (2º semestre), quando a temperatura tende a aumentar, o método H_(OBS) apresentou maior variabilidade nos totais da ETo ao longo dos meses, e no entanto, subestimou os valores encontrados por P_(OBS), além de ter apresentado boa simetria nos dados, o que foi constatado pelo posicionamento da mediana em Julho, Novembro e Dezembro.

Verificou-se ainda que, nos meses mais úmidos, os três métodos apresentaram pouca variação individual de um mês para outro, o mesmo ocorrendo no período mais seco (Julho a Dezembro). Além do mais, no período seco, a mediana tende a permanecer com pouca variação para H_(OBS), o que quer dizer que a ETo apresenta pouca variabilidade nesse período, porém com valores mais elevados e com baixa oscilação.

No 2º semestre (Figura 27), de Julho a Dezembro, quando a temperatura e o vento começam a aumentar, detecta-se o surgimento de extremos altos (*outliers*) de ETo pelo método de Hargreaves-Samani H_(OBS) em Julho, Novembro e Dezembro, e por Penman-Monteith FAO56 P_(OBS) em Novembro e Dezembro, o que também pôde ser visto com maior frequência no 1º semestre (Figura 26), apesar de que com menor intensidade.

Estes *outliers* não estão relacionados a períodos atípicos na série, mas diretamente conectados às falhas. Por exemplo, no caso específico de realização do Thiessen envolvendo três estações, onde apenas uma delas possuía dados para aquele mês específico (Janeiro de 1993), o resultado do acumulado mensal será diretamente mostrado como sendo apenas o desta única estação. Assim, a ausência impacta diretamente no acumulado médio de cada mês, sendo esse valor apresentado como um *outlier*.

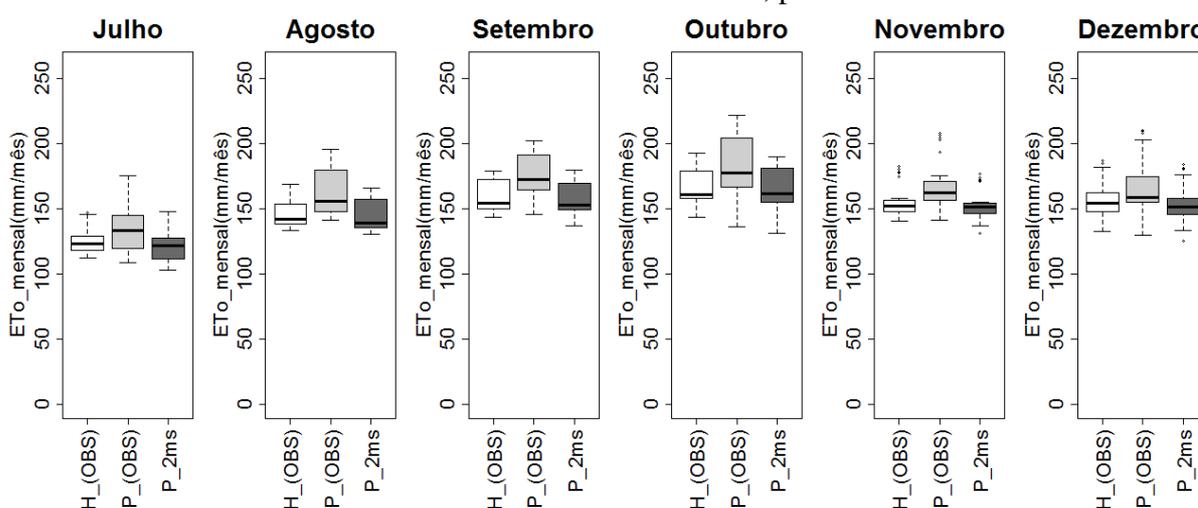
Logo, ao calcular-se o Thiessen, esse problema pode se repetir para as demais estações envolvidas na obtenção do acumulado médio mensal. Assim, esses valores

discrepantes (*outliers*), sejam eles baixos ou altos, estão relacionados a falhas na série, e não a um valor “extremo” de ETo ou das variáveis envolvidas no processo, e puderam ser notados nos dois semestres e nos dois métodos empregados (Figura 26 e Figura 27).

Agora analisando P_2ms no 2º semestre, como a velocidade do vento aumenta e, ao mesmo tempo, apresenta grande variação, mantê-la constante em 2m/s indica um grande predomínio da temperatura, pois os valores de ETo praticamente coincidiram com os valores de ETo pelo método de Hargreaves-Samani H_(OBS), mostrando baixa dispersão.

Uma possível explicação para esse fato, como dito anteriormente, estaria no predomínio da temperatura em relação ao vento no processo da evapotranspiração. No entanto, ambos os métodos (H_OBS e P_2ms) poderiam ser utilizados sem ressalvas para estimar a ETo no Estado do Ceará, para o 2º semestre do ano.

Figura 27 – *Boxplot* da ETo mensal no período de 1976 – 2005, estimada pelos métodos de Penman-Monteith FAO56 (P), Hargreaves-Samani (H) e Penman-Monteith FAO56 (P_2ms) com velocidade do vento constante de 2m/s, para o 2º semestre.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.2.5 Análise mensal da ETo no período histórico com dados observados e dados dos Modelos do CMIP5

Nesta etapa, será analisado o comportamento da ETo no período histórico dos modelos, a partir de alguns critérios: (i) ETo estimada com dados observados; (ii) ETo estimada com dados dos modelos climáticos (dados brutos e corrigidos); (iii) ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56, com dados observados e climáticos, considerando a velocidade do vento constante de 2m/s. A análise seguirá comparando os critérios (i), (ii) e (iii), para todos os Modelos de Circulação Global do CMIP5.

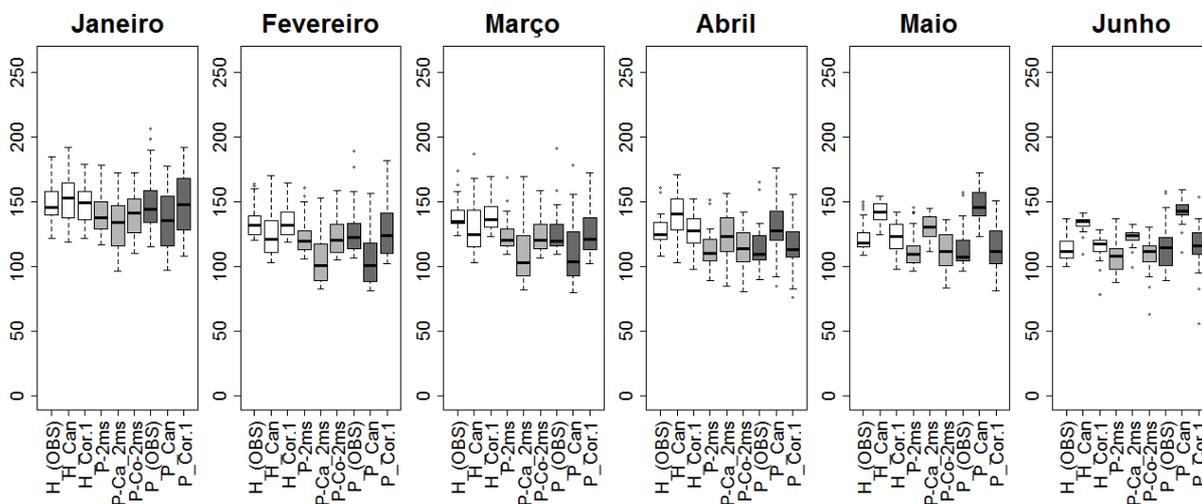
5.2.6 Modelo CanESM2

Comparando os critérios (i) e (ii) para o 1º semestre, para o método de Hargreaves, percebeu-se que os dados brutos do modelo (H_Can), quando corrigidos (H_Cor.1) pelos dados observados H_(OBS), mantiveram boa representatividade da ETo observada H_(OBS), porém não conseguiu manter a variabilidade, com destaques para os 3º e 4º quartis.

Em relação ao método de Penman-Monteith FAO56, os dados brutos (P_Can), quando corrigidos (P_Cor.1), apresentaram um bom desempenho do modelo em relação aos dados observados P_(OBS), no que diz respeito à mediana. Mesmo após a correção, o modelo manteve-se com grande variabilidade em todos os meses do 1º semestre, exceto Junho, que se apresentou com baixa variabilidade e com boa simetria.

Agora, analisando o critério (iii), foi possível notar que os dados brutos (P_Ca_2ms), quando corrigidos (P-Co2ms) pelos dados observados P_2ms, também apresentaram um bom desempenho em relação à mediana, quando comparados aos observados P_2ms, todavia mantendo grande variabilidade (Figura 28).

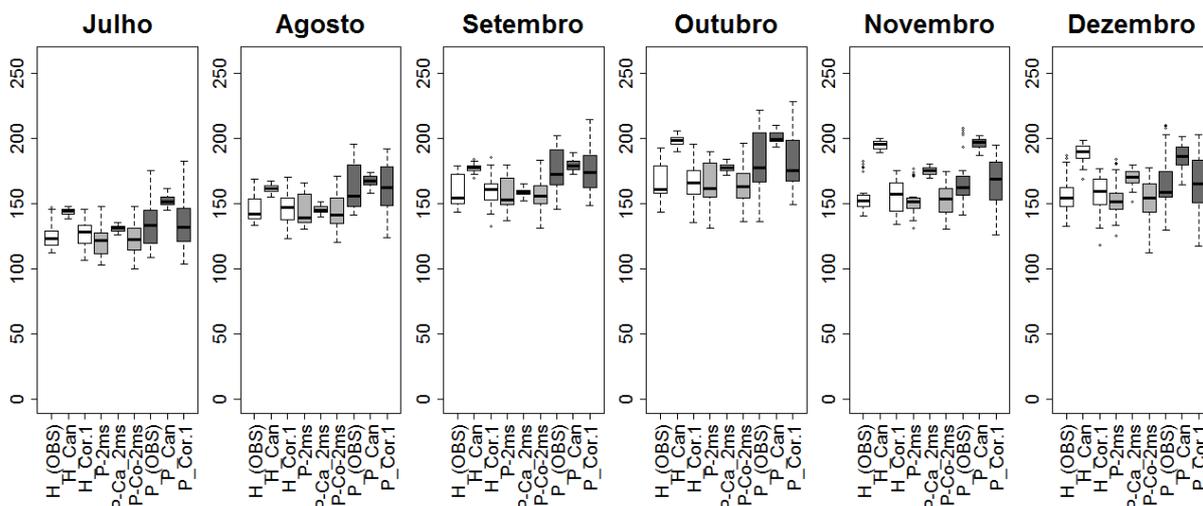
Figura 28 – *Boxplot* da ETo mensal, com dados observados, brutos (CanESM2) e corrigidos, no 1º semestre.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Comparando-se os mesmos critérios para o 2º semestre, foi possível perceber que nesse período, semelhantemente ao primeiro, os dados brutos do modelo não conseguiram acompanhar a variabilidade dos observados, porém, quando corrigidos, percebeu-se uma leve melhora na variabilidade, o que foi constatado para os três métodos sob análise. Assim, com essa leve melhora na variabilidade, esse modelo pode ser apresentado como uma possível alternativa da ETo (Figura 29).

Figura 29 – *Boxplot* da ETo mensal, com dados observados, brutos (Can-ESM2) e corrigidos, no 2º semestre.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

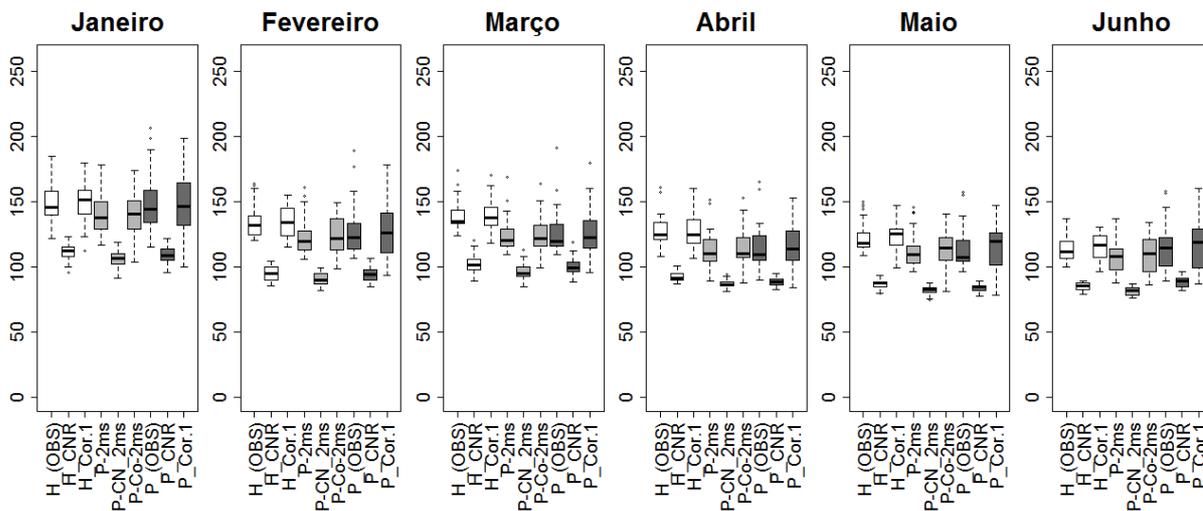
5.2.7 Modelo CNRM-CM5

Para este modelo, a ETo com dados brutos por Hargreaves-Samani (H_CNR), Penman-Monteith FAO56 (P_CNR) e Penman-Monteith FAO56 com vento constante (P_CN_2ms) apresentaram-se bem abaixo da ETo observada, nos três métodos utilizados e em todos os meses do ano. Porém, quando corrigidos os resultados, os métodos mostraram desempenho satisfatório em relação ao dado observado, mantendo-se praticamente com as mesmas características de dispersão dos mesmos.

Para o 1º semestre, a ETo por Hargreaves, depois de corrigida (H_Cor.1), manteve-se com características similares às da observada H_(OBS), permanecendo acima da estimada pelo método de P_(OBS), nos meses de Fevereiro a Maio. No 1º semestre, os dados, mesmo depois de corrigidos, tenderam a apresentar maior dispersão nos limites superiores e inferiores, variando com isso a posição da mediana, o que pôde ser percebido nos três métodos adotados. Mesmo diante desse cenário, essa dispersão não compromete a representatividade do modelo (Figura 30).

No 2º semestre, os dados brutos do modelo não conseguiram boa representatividade da ETo em relação ao dado observado. Apesar de a ETo observada ter se mantido com assimetria positiva de Agosto a Outubro, os modelos quando corrigidos não apresentaram as mesmas características, pois mantiveram variação entre os limites superiores e inferiores, assim como ocorreu no 1º semestre.

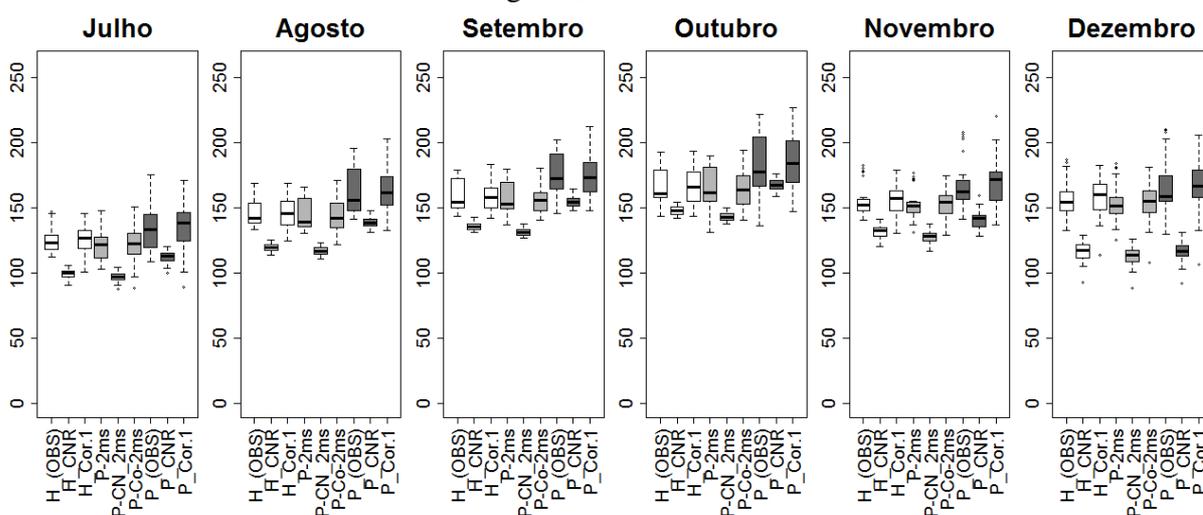
Figura 30 – Boxplot da ETo mensal, com dados observados, brutos (CNRM-CM5) e corrigidos, no 1º semestre.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Uma informação relevante é que, quando se mantém a velocidade do vento constante em 2m/s, os dados brutos (P-CN_2ms) quando corrigidos (P-Co_2ms), sinalizaram características semelhantes ao método de Hargreaves-Samani. Essa informação poder ser reforçada pela diminuição do vento, como já dito anteriormente, para 2m/s, quando há um predomínio das temperaturas no processo da ETo. Portanto, seria uma boa alternativa utilizar os dados do modelo em substituição aos observados, para o referido período (Figura 31).

Figura 31 – Boxplot da ETo mensal, com dados observados, brutos (CNRM-CM5) e corrigidos, no 2º semestre.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

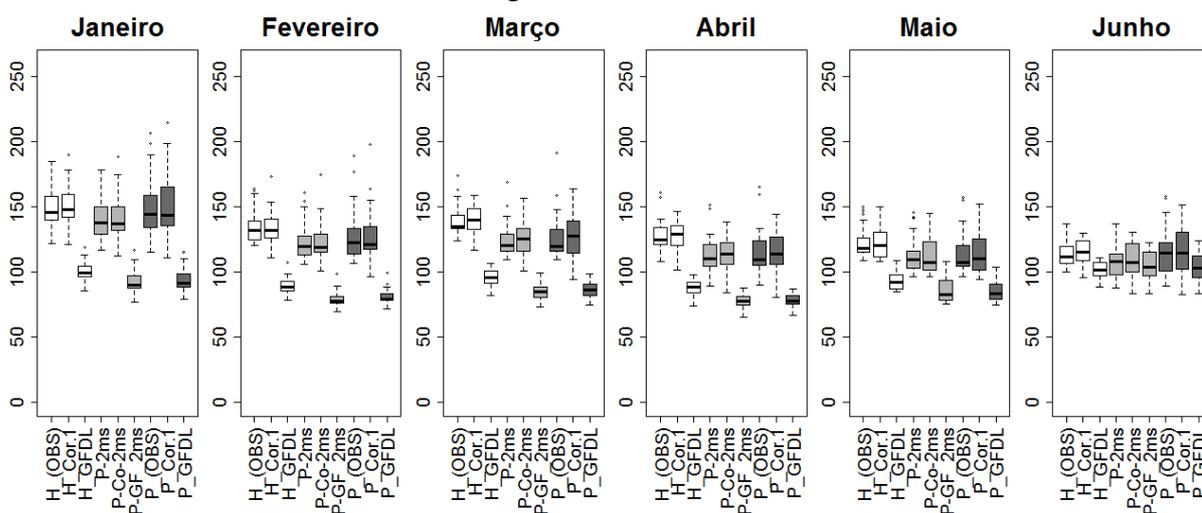
5.2.8 Modelo GFDL-ESM2G

Analisando e comparando os resultados segundo os mesmos critérios anteriormente mencionados (*i*, *ii* e *iii*) para o 1º semestre, inicialmente interpretando o método de Hagreaves-Samani (H_GFDL) quando corrigido (H_Cor.1), os dados, de certa forma, procuraram melhorar a simetria (analisando pela mediana), ou seja: a distribuição dos dados foi mais ou menos simétrica, ou, melhor dizendo, não apresentou tendências.

Já para o método de Penman-Monteith FAO56 (P_GFDL), os dados depois de corrigidos (P_Cor.1) exibiram forte variação na mediana, nos meses de Janeiro a Abril, onde a mediana deslocou-se para um dos quartis, mostrando assimetria entre os dados, ou seja: maior dispersão a partir do 2º quartil. Essa variação pode estar relacionada à variação das variáveis envolvidas no processo, uma vez que compreende parte do período pré-chuvas e a estação chuvosa propriamente dita, ou devido ao fato de o modelo apresentar maior dispersão entre os valores mais altos com os dados brutos, principalmente nos meses de Janeiro e Fevereiro.

Nos meses de Maio e Junho, a situação melhora significativamente, pois os dados corrigidos (P_Cor.1) apresentaram praticamente a mesma mediana, porém tendendo aos quartis de menor dispersão, o que também foi visto nos dados observados P_(OBS). Quando foi adotada a velocidade do vento de 2m/s, um melhor desempenho com os dados corrigidos pôde ser percebido nos meses de Janeiro, Fevereiro e Abril (Figura 32).

Figura 32 – *Boxplot* da ETo mensal, com dados observados, brutos (GFDL-ESM2G) e corrigidos, no 1º semestre.

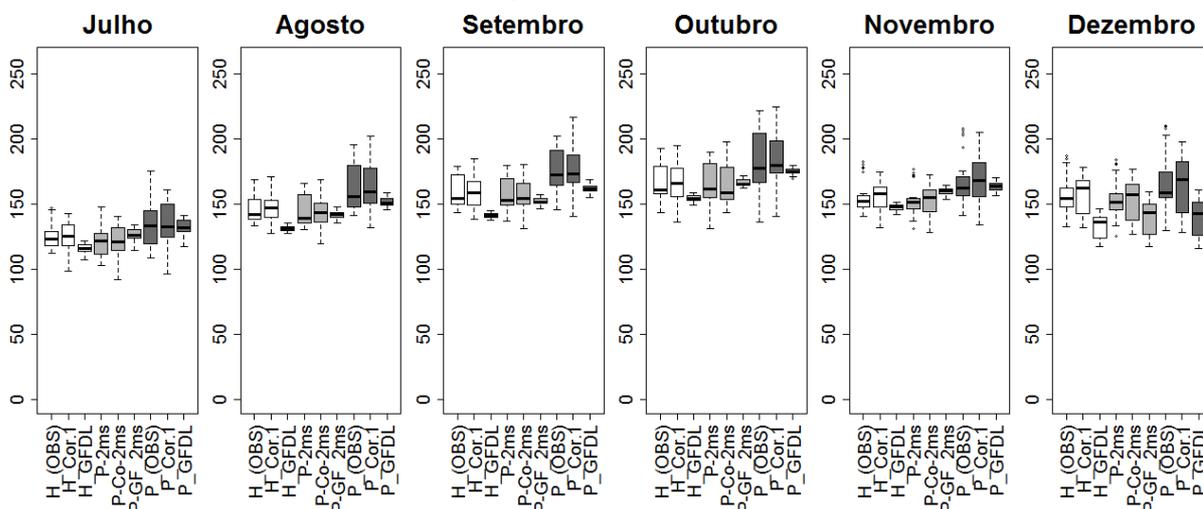


Fonte: Elaborado pelo Autor.

No 2º semestre, nos três métodos avaliados, todos apresentaram variabilidade, mesmo após corrigidos, mostrando que esse modelo apresentou um baixo desempenho na

representatividade da ETo, quando seus resultados foram comparados aos dados observados (Figura 33).

Figura 33 – *Boxplot* da ETo mensal, com dados observados, brutos (GFDL-ESM2G) e corrigidos, no 2º semestre.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

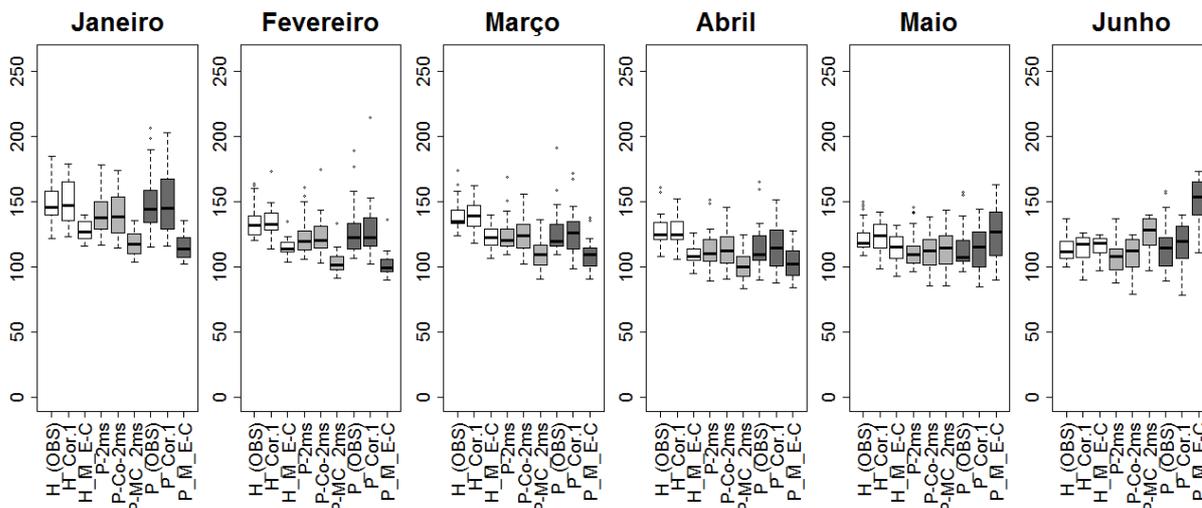
5.2.9 Modelo MIROC-ESM-CHEN

Para este modelo, os dados brutos pelos três métodos, Penman-Monteith FAO56 (P_M_E-C), Hargreaves-Samani (H_M_E-C), e Penman-Monteith FAO56 com velocidade do vento de 2m/s (P-MC_2ms), de Janeiro a Abril, situaram-se sempre abaixo do observado. Diferentemente do 2º semestre (Figura 35), onde os mesmos ficaram acima dos dados observados, com exceção do mês de Dezembro.

Esse comportamento justifica a aplicação do método de correção, a fim de controlar o comportamento tendencioso da variável. Devido à assimetria nos dados observados, o comportamento da ETo, quando corrigida, tendeu a acompanhar os dados observados. Uma vez que os dados modelados apresentem assimetria, conseqüentemente, quando corrigidos, tentarão seguir o padrão observado.

Nesse caso, o modelo não conseguiu, depois de corrigido, uma boa representatividade da ETo em comparação ao observado, para nenhum dos três métodos, comportando-se com variabilidade entre os limites inferiores e superiores. O melhor resultado se deu, nos meses de Fevereiro e Abril, para (H-Cor.1) e (P-Cor.1) e para Penman-Monteith FAO56 considerando o vento de 2m/s (P-Co_2ms) (Figura 34).

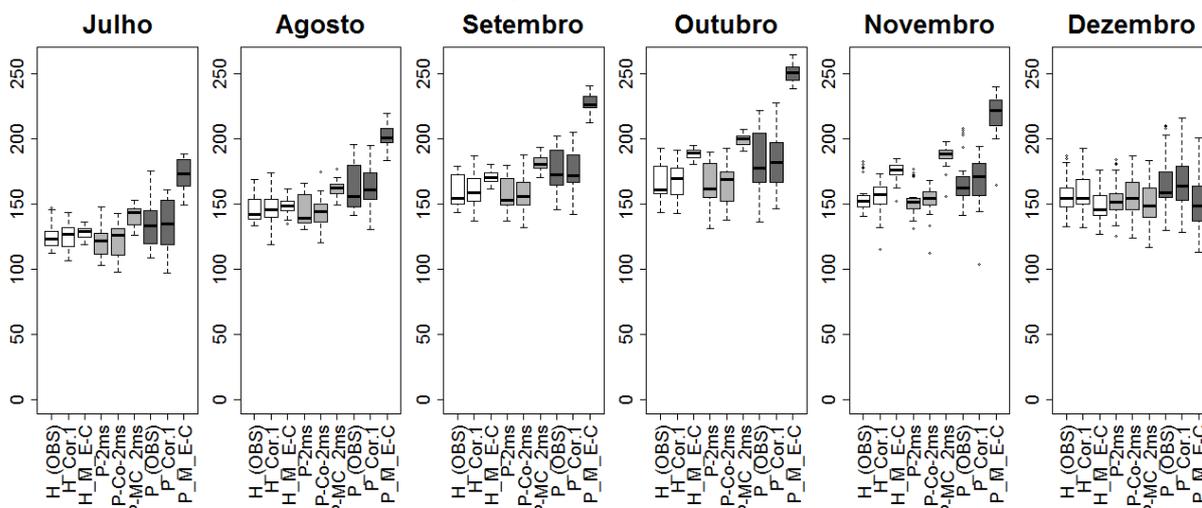
Figura 34 – *Boxplot* da ETo mensal, com dados observados, brutos (MIROC-ESM-CHEN) e corrigidos, no 1º semestre.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No entanto, para o 2º semestre, os resultados do modelo, de maneira geral, não conseguiram simular apropriadamente a ETo observada nos três métodos, apresentando baixo desempenho, exceto para o método (P-Co_2ms) no mês de Novembro, que apresentou um bom desempenho em relação ao observado P_2ms, apesar da presença de dois extremos baixos (Figura 35).

Figura 35 – *Boxplot* da ETo mensal, com dados observados, brutos (MIROC-ESM-CHEN) e corrigidos, no 2º semestre.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.2.10 Modelo MIROC-ESM

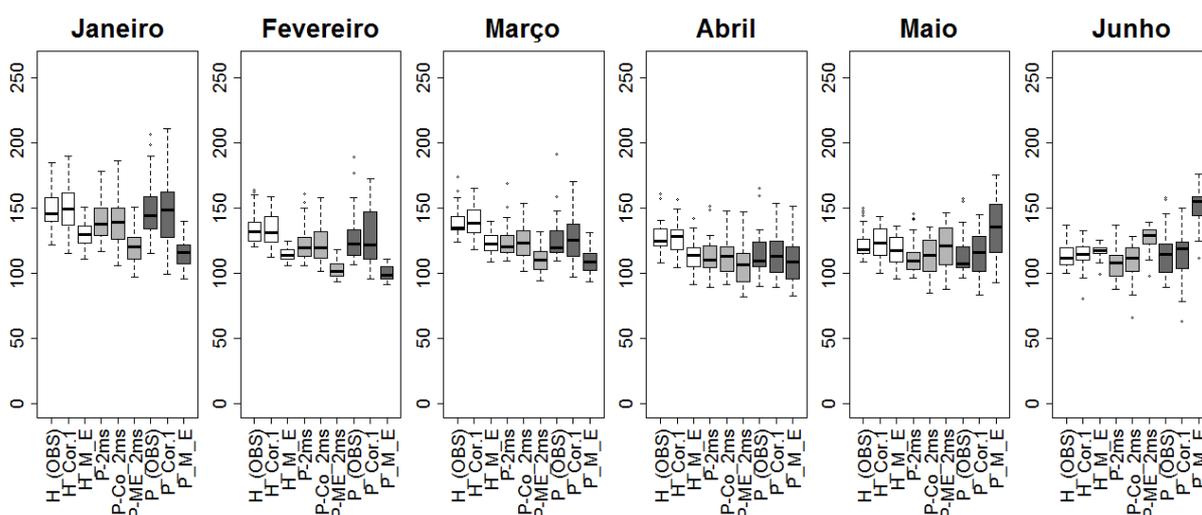
Os resultados desse modelo, para o método de Hargreaves-Samani, os dados brutos

(H_M_E), quando corrigidos (H_Cor.1) pelos dados observados (H_OBS), mostrou grande variação de dispersão dos quartis, como no caso do mês de Janeiro, Março, Abril e Maio, com exceção de Junho e Fevereiro, meses de melhor representatividade em relação ao observado.

A mesma variabilidade pôde ser visualizada nos demais métodos, para o 1º semestre. De maneira geral, o modelo, mesmo depois de corrigido, não conseguiu um bom desempenho para este semestre em relação ao observado, nos três métodos (Figura 36).

No 2º semestre, os dados brutos do modelo não conseguiram representar a variabilidade da ETo observada. Quando corrigido, o modelo apresentou um bom desempenho apenas com os métodos de Hargreaves-Samani (H_Cor.1) e Penman-Monteith FAO56 com velocidade do vento de 2m/s (P-Co_2ms), para os meses de Julho e Dezembro.

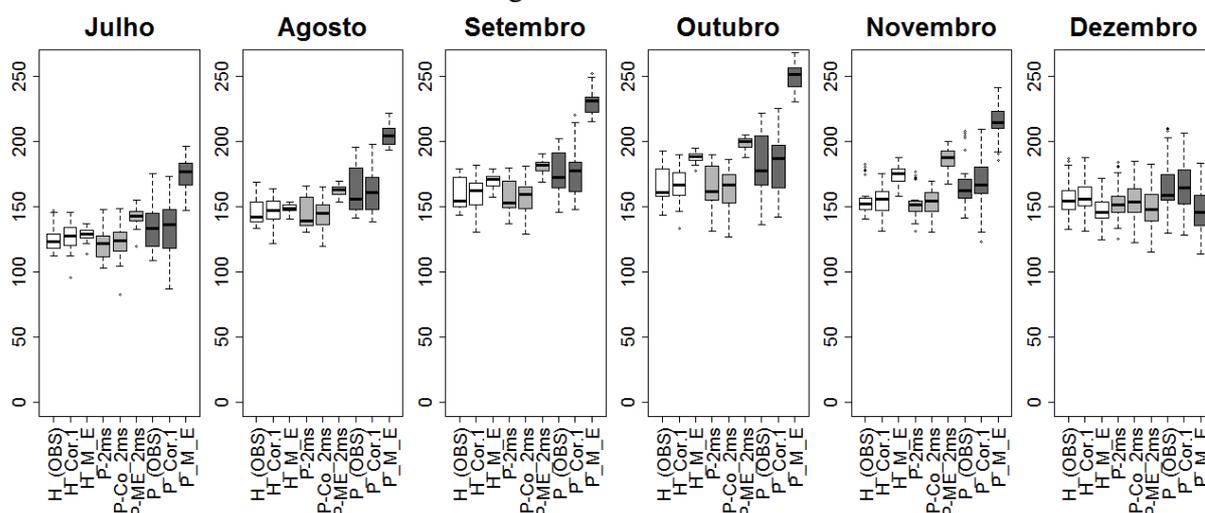
Figura 36 – *Boxplot* da ETo mensal, com dados observados, brutos (MIROC-ESM) e corrigidos, no 1º semestre.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nos demais meses, o modelo não obteve um bom resultado nos três métodos, indicando que, mesmo depois de corrigido, a alta variabilidade se manteve, porém de forma mais discreta. O que chama a atenção é que, quando Hargreaves-Samani (H_Cor.1) foi corrigido e comparado a Penman-Monteith FAO56 (P-Co_2ms), os resultados apresentam semelhança, devido não a uma influência da velocidade do vento no processo de estimativa da ETo, mas, sim, a um predomínio das temperaturas (Figura 37).

Figura 37 – *Boxplot* da ETo mensal, com dados observados, brutos (MIROC-ESM) e corrigidos, no 2º semestre.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

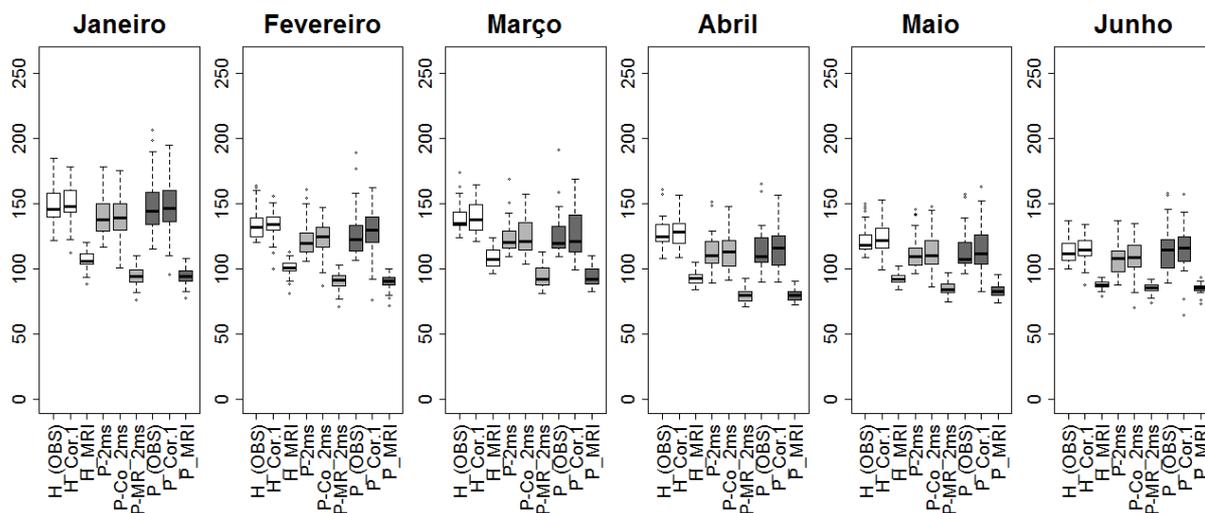
5.2.11 Modelo MRI-CGM3

Nesse modelo, os dados brutos nos três métodos – Hargreaves-Samani (H-MRI), Penman-Monteith FAO56 (P-MRI) e Penman-Monteith FAO56 com vento 2m/s (P-MR_2ms) –, em relação ao observado – Hargreaves-Samani H_(OBS), Penman-Monteith FAO56 P_(OBS) e Penman-Monteith FAO56 com vento 2m/s (P_2ms) –, mostraram-se totalmente subestimados em todos os meses do ano.

Após corrigidos, Hargreaves-Samani (H_Cor.1), para o mês de Junho, Penman-Monteith FAO56 (P_Cor.1) em Janeiro, e Penman-Monteith FAO56 com vento 2m/s (P_Co2ms) em Junho, exibiram comportamento aceitável para esses meses do 1º semestre, apresentando valores discrepantes (*outliers*), além de manter praticamente a mesma medida de tendência central e reduzindo a dispersão (Figura 38).

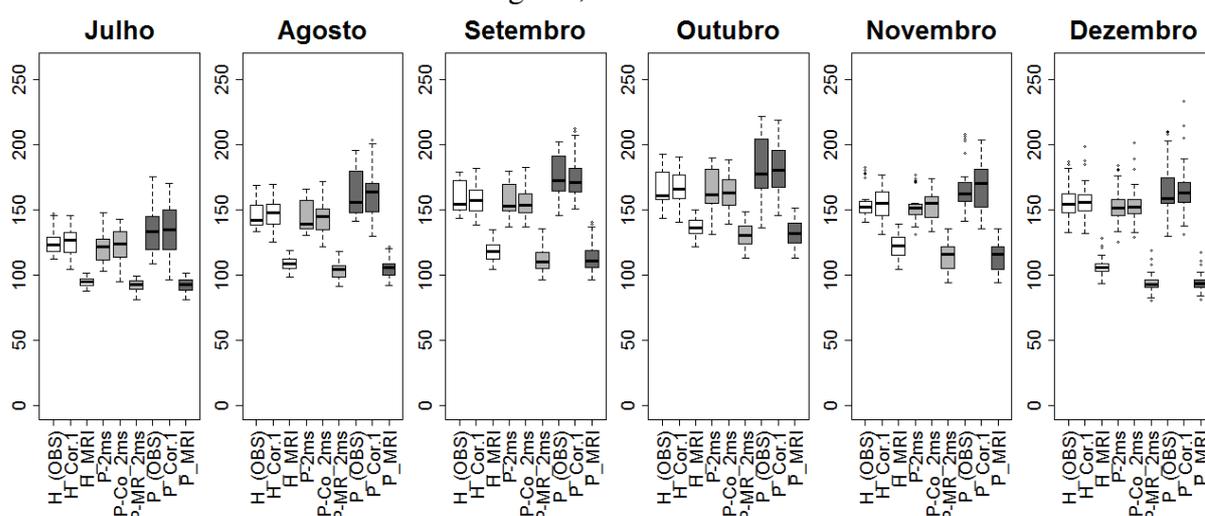
Para o 2º semestre, os resultados mostraram-se ainda melhores do que no 1º semestre, principalmente para (H_Cor.1) e (P_Co2_ms). Embora a presença de alguns *outliers*, tal como especificamente no mês de Dezembro nos três métodos analisados, os resultados mostraram-se bem expressivos em relação ao observado, indicando que, no período mais seco da região, onde ocorre um predomínio das temperaturas, o modelo apresentou um bom comportamento, diferentemente de (P_Cor.1), que, por sua vez, apresentou variáveis com maior variabilidade nesse período, principalmente o vento (Figura 39).

Figura 38 – *Boxplot* da ETo mensal, com dados observados, brutos (MRI-CGM3) e corrigidos, no 1º semestre.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 39 – *Boxplot* da ETo mensal, com dados observados, brutos (MRI-CGM3) e corrigidos, no 2º semestre.

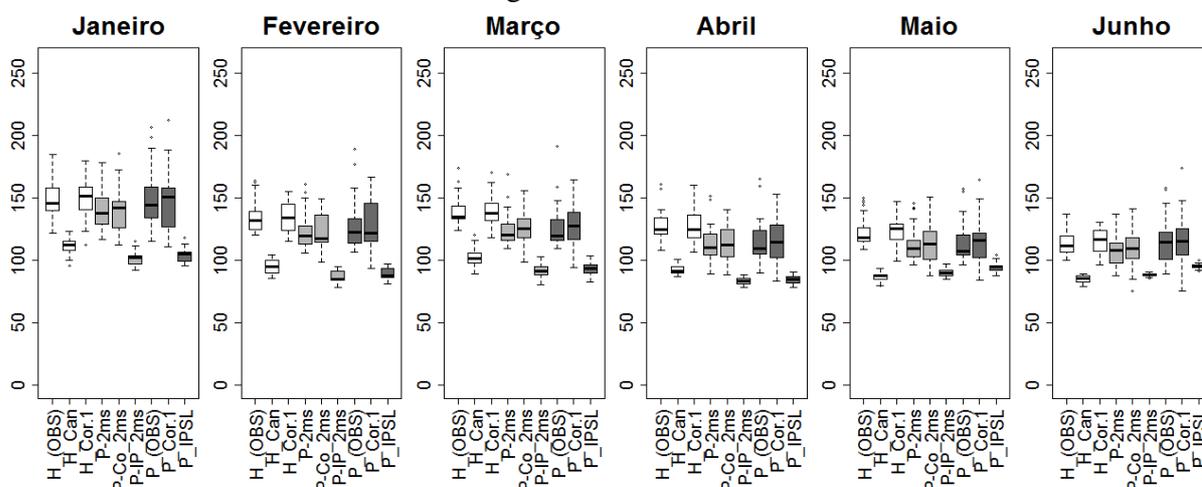


Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.2.12 Modelo IPSL-CM5A-MR

Praticamente a mesma análise do modelo MRI-CGM3 pôde ser aplicada ao modelo IPSL-CM5A-MR, pois ambos apresentaram dados brutos (sem correção) com elevada subestimativa em relação ao observado, em todos os meses do ano, para os três métodos empregados. Porém, no 1º semestre, o melhor desempenho do modelo com resultado aceitável ocorreu nos meses de Abril e Junho, apontado pelo método de Penman-Monteith FAO56 com vento 2m/s (P_Co2ms) e para o mês de Janeiro pelo método (H_Cor.1) (Figura 40).

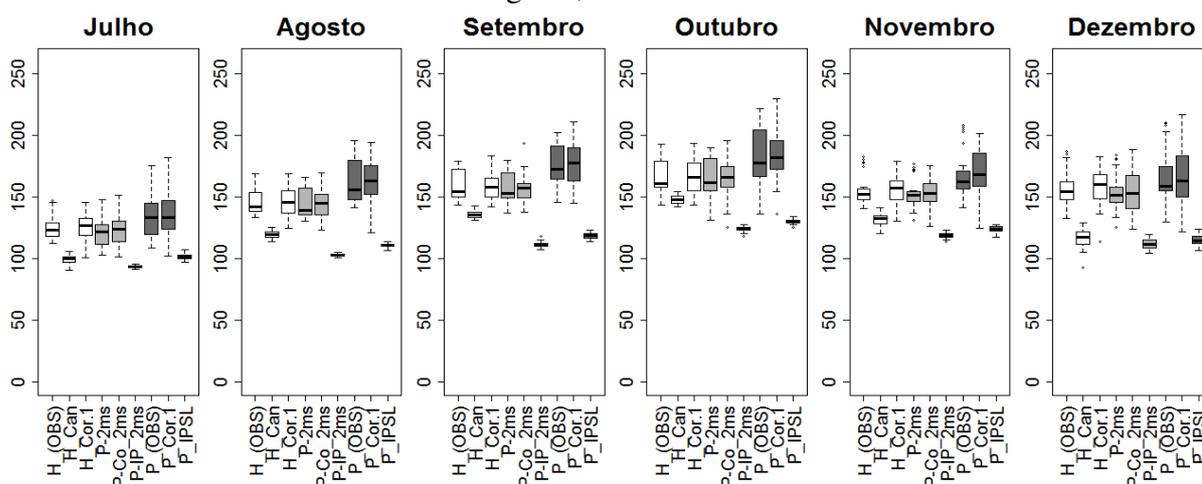
Figura 40 – *Boxplot* da ETo mensal, com dados observados, brutos (IPSL-CM5A-MR) e corrigidos, no 1º semestre.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No 2º semestre, o desempenho foi melhor para os métodos de Hargreaves-Samani (H_Cor.1) nos meses de Agosto, Outubro e Dezembro, e Penman-Monteith FAO56 (P_Co2_ms) para os meses de Julho, Agosto e Outubro, embora ambos apresentaram *outliers* em Outubro, e mantiveram baixa variabilidade interquartil. Diferentemente do método de Penman-Monteith FAO56 (P_Co.r1), que apresentou maior variabilidade interquartil (Figura 41).

Figura 41 – *Boxplot* da ETo mensal, com dados observados, brutos (IPSL-CM5A-MR) e corrigidos, no 2º semestre.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A seguir são mostrados os resultados das projeções futuras (2011-2100) da ETo a nível mensal, semestral e anual, nos cenários de mudanças climáticas, RCP4.5 e RCP8.5.

5.3 Avaliação das mudanças de clima em termos de Evapotranspiração Potencial no Estado do Ceará

A seguir, serão mostradas as projeções futuras de média mensal da ETo, nos dois cenários de mudanças climáticas: RCP4.5 (nível intermediário de concentração de CO₂) e RCP8.5 (concentração máxima de CO₂). A ETo foi corrigida em função dos dados observados, e para isso, foi utilizada a distribuição Gama. A ETo projetada (modelada) será comparada à do período histórico (1976-2005), com os resultados dos três métodos: Penman-Monteith FAO56 P_(OBS); Hargreaves-Samani H_(OBS) e Penman-Monteith FAO56 com vento constante de 2m/s (P_2ms).

A análise da representatividade da ETo de cada modelo em função dos dados observados seguirá a seguinte ordem:

- 1º Modelo (Can-ESM2);
- 2º Modelo (CNRM-CMR5);
- 3º Modelo (GFDL-ESM2G);
- 4º Modelo (MIROC-ESM-CHEN);
- 5º Modelo (MIROC-ESM);
- 6º Modelo (MRI-CGM3); e
- 7º Modelo (IPSL-CM5A-MR).

Devido ao grande número de figuras, serão mostradas no corpo principal do trabalho apenas as figuras do período de 2041 a 2070, nos dois cenários RCP analisados. As demais figuras dos outros períodos encontram-se nos Apêndices A e B, ao final do trabalho.

A discussão sobre a ETo nos cenários de mudanças climáticas para o Estado do Ceará será comentada logo a seguir. O percentual de aumento será considerado significativo ou não, dependendo da variabilidade dos dados observados. Por exemplo: um percentual de aumento projetado para 10% será considerado aumento significativo se, e somente se, o mês em questão apresentar baixa variabilidade, ou seja: um pequeno desvio-padrão. Caso contrário, indicará apenas aumento. Como forma de avaliar se o percentual de aumento é estatisticamente significativo, foi aplicado o teste de hipótese da diferença de médias, também conhecido como *testes z*. As médias e os desvios-padrão estão mostrados em figuras do tipo gráficos de linhas, como poderá ser visto adiante.

5.3.1 Estimativa da ETo por Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP4.5

Partindo para o cenário de concentração média de CO₂, foi possível perceber que os modelos ou projetaram aumento na ETo em todos os meses, ou se mantiveram em torno da média. Os maiores destaques de aumento foram projetados pelos modelos CanESM2, com aumento de 14,7% em Março, e pelos modelos MIROC-ESM e MIROC-ESM-CHEN, com um aumento entre 7% e 22%, para o período de Março a Dezembro. Os demais modelos mantiveram-se com projeções em torno da média, variando no máximo em 8% (ver Figura 74, no Apêndice A).

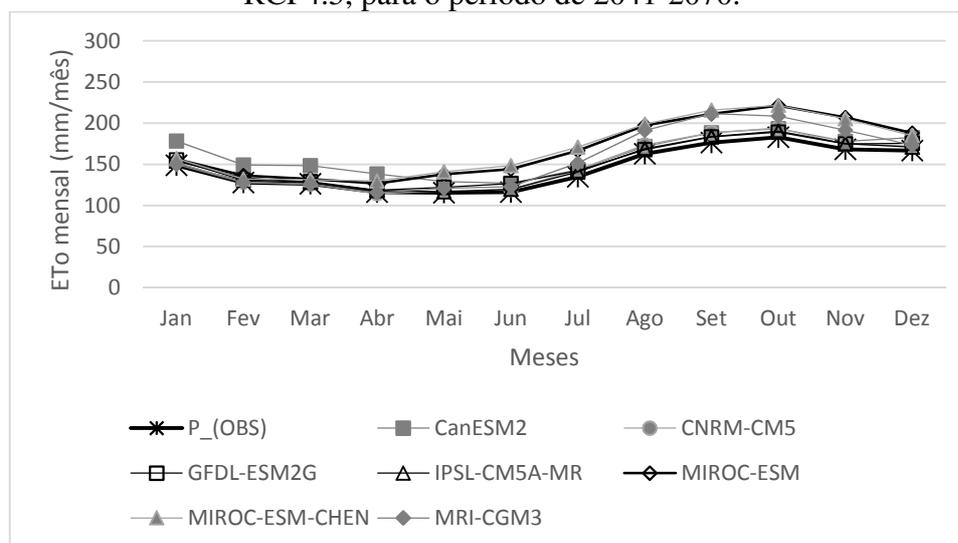
Com relação à variância, apenas dois modelos, CanESM2 e GFDL-ESM2G, mantiveram proximidade com a variabilidade da ETo observada P_(OBS) entre Março e Novembro. Os demais mantiveram-se dentro do intervalo médio de 10-30 mm/mês, exceto o modelo MIROC-ESM, que registrou maior variação, com, no máximo, 40,3 mm/mês no mês de Fevereiro (Figura 75, Apêndice A).

Para o período de 2041-2070, os modelos exibiram alguma variação nas projeções de aumento ao longo do ano, nos meses de Janeiro a Maio. Apenas o modelo CanESM2 projetou aumento mais expressivo, entre 12% e 20%, enquanto os demais permaneceram dentro do padrão de normalidade.

Para os meses de Abril a Dezembro, assim como no período anterior, os modelos MIROC-ESM e MIROC-ESM-CHEN continuaram liderando as projeções de aumento, variando entre 11% e 27%, nos meses de Abril a Dezembro. O modelo MRI-CGM3 apontou aumento médio menor que 20% entre os meses de Julho e Dezembro, e os demais modelos, de Junho a Dezembro, mostraram-se com projeções pouco acima do observado (clima presente), sendo menores que 8% (Figura 42).

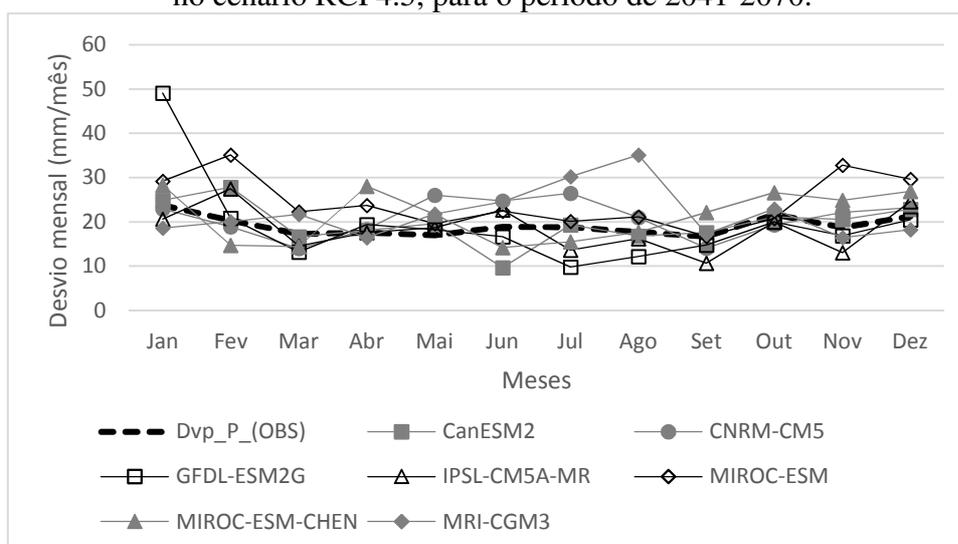
Dentre todos os modelos, o GFDL-ESM2G apresentou maior desvio-padrão para o mês de Janeiro, por volta de 50 mm/mês, seguido do modelo MIROC-ESM em Fevereiro e Novembro, acima de 30 mm/mês, e do MRI-CGM3, para os meses de Julho e Agosto, variando pouco acima de 30 a 35 mm/mês. O menor desvio-padrão foi verificado no período de Julho a Novembro, em cerca de 10 mm/mês, apontado pelo modelo GFDL-ESM2G. Os demais modelos indicam variabilidade entre 10 e 29 mm/mês (Figura 43).

Figura 42 – ETo mensal estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 43 – Desvio-padrão mensal da ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quando a análise foi estendida para o final do século (2071-2100), percebeu-se que os modelos mantiveram-se com as mesmas projeções de aumento por eles apontadas para o período anterior (2041-2070), porém com percentual um pouco mais elevado. Por exemplo, o modelo MIROC-ESM-CHEN, para o mês Maio, projetou um aumento 17,3% maior do que no período anterior (2041-2070). Para o mês de Outubro (maior pico da ETo), o aumento foi bem menor, cerca de 3,5%.

Já o modelo MRI-CGM3 apresentou aumento de 10,1% para o mês de Setembro, e o modelo CanESM2, um aumento de 13,9% para o mês de Março. Os demais modelos

projetaram aumentos de maneira ordinária, de pouco mais de 2% de Junho a Dezembro, quando comparado ao período anterior (2041-2070) (ver Figura 76, Apêndice A).

Nesse período, os modelos apresentaram desvios-padrão bem expressivos em praticamente todos os meses, em comparação ao observado, à exceção dos modelos CanESM2 e MIROC-ESM-CHEN, que apresentaram melhor desempenho no período de Julho a Dezembro, praticamente a mesma variabilidade observada. Os demais modelos apresentaram grande variabilidade em torno da média (ver Figura 77, Apêndice A).

5.3.2 Estimativa da ETo por Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP8.5

Mesmo com o aumento da concentração de CO₂ para 2011-2040, os modelos MIROC-ESM e MIROC-ESM-CHEN mostraram a maior projeção de aumento da ETo, entre Março e Dezembro, em relação ao clima presente, com percentual variando entre 7% e 24%.

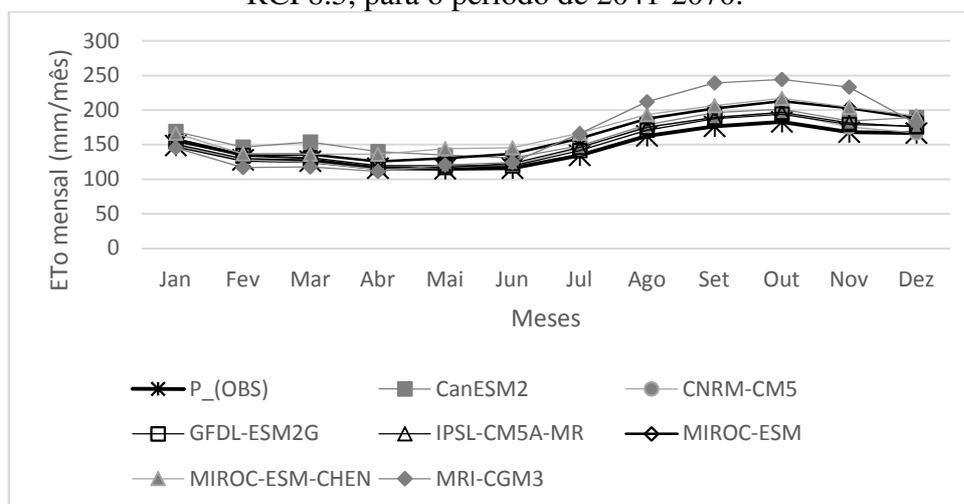
O modelo MRI-CGM3 indicou aumento entre 9% e 12%, em média, para os meses de Agosto a Novembro, enquanto que os demais modelos indicam aumento por volta de 1% a 5% no 2º semestre. No 1º semestre, apenas o modelo CanESM2 projetou um aumento mais expressivo, em torno de 18,3%, para o mês de Março, enquanto os demais apontaram projeções de aumento variando entre 1% e 14% para o período de Janeiro a Abril (ver Figura 78, Apêndice A).

Nesse cenário, apenas os modelos GFDL-ESM2G e MRI-CGM3 apresentaram desvio-padrão acima de 35 mm/mês, para Janeiro e Julho, respectivamente. Os modelos GFDL-ESM2G e MIROC-ESM-CHEN apresentaram variabilidade em torno da média, semelhante à observada, principalmente de Julho a Novembro (ver Figura 79, Apêndice A).

Para o período de 2041-2070, pôde-se notar um incremento positivo em relação ao período 2011-2040, com destaque para o modelo MRI-CGM3, de Julho até Novembro, o maior percentual expressivo de aumento, oscilando entre 23% e 39%, com destaques aos meses de Agosto a Novembro, quando registrou aumento de mais de 30%. Já no 1º semestre, de Janeiro a Abril, projetou diminuição entre 9% e 12%.

Os modelos MIROC-ESM e MIROC-ESM-CHEN projetaram aumento entre 7% e 26% para o 1º semestre, sendo destaque os meses de Maio e Junho, pouco acima dos 25%, e em torno de 17% a 24% para o 2º semestre. Os demais modelos indicaram aumento menor para os dois semestres, variando entre 1% e 10%, com exceção do modelo CanESM2, que projetou para o mês de Março um aumento de aproximadamente 22% em relação ao clima presente (Figura 44).

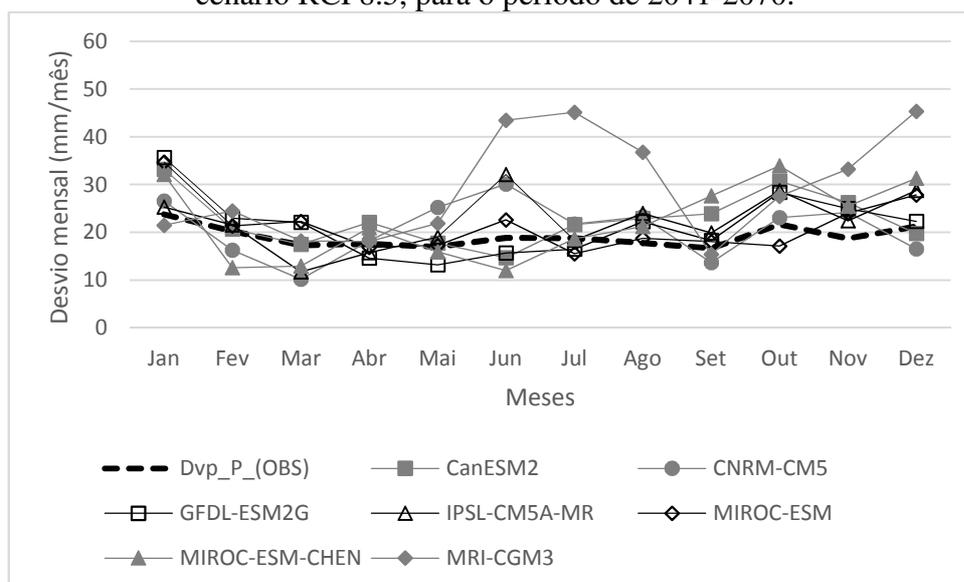
Figura 44 – ETo mensal estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O modelo MRI-CGM3, apesar de apresentar projeção de aumento da ETo desde Julho, mostrou grande variabilidade em Junho, Julho e Dezembro, em média, acima de 40 mm/mês, diferentemente do mês de Setembro, que registrou 15,4 mm/mês. Com isso, nesse mês, a ETo manteve-se com baixa variação em torno da média. Para os demais modelos, em sua maioria, foi registrado um desvio-padrão variando, em média, entre 10 e 25 mm/mês ao longo do ano (Figura 45).

Figura 45 – Desvio padrão mensal ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No período 2071-2100, o percentual de aumento não variou significativamente ao

longo do ano em relação ao período de 2041-2070, com exceção dos modelos CanESM2 no 1º semestre, e MRI-CGM3 no 2º semestre, que sinalizaram um aumento expressivo em relação ao clima presente. Para o modelo CanESM2, esse aumento significou elevação expressiva da ETo entre Janeiro e Junho, variando entre 21 e 48%, com variação máxima projetada para o mês de Março, com um percentual de pouco mais de 47%, seguido por Abril, com cerca de 42%.

O modelo MRI-CGM3 projetou, entre Julho e Dezembro, uma elevação variando de 22 a 55%, para os meses de Agosto a Novembro, com percentual acima de 50%. Os demais modelos avaliados projetaram aumento para o 1º semestre, de, no máximo, 30% (registrado pelo modelo MIROC-ESM-CHEN para Junho), e nos demais meses desse semestre, os modelos oscilaram suas projeções de aumento, porém, com percentual menor que 30%.

No 2º semestre, exceto o MRI-CGM3, em média, os maiores percentuais de aumento foram encontrados nas respostas dos modelos MIROC-ESM e MIROC-ESM-CHEN, em torno dos 23%, e os demais modelos variando de 9 a 23%, em relação ao clima presente. Isto reforçou a tese de que, caso os cenários de emissões de CO₂ se concretizarem, haverá um crescimento da ETo no 2º semestre, previsto por todos os modelos.

Estas projeções de aumento podem ser consideradas significativas, uma vez que a região já produz um potencial elevado de ETo, contribuindo para o agravamento do problema de escassez hídrica. Esse tipo de informação a longo prazo é de suma importância para o gerenciamento dos recursos hídricos (Figura 80, Apêndice A).

Os modelos que apresentaram maior variabilidade da ETo em torno da média foram o GFDL-ESM2G, para Janeiro, com desvio-padrão pouco acima dos 48 mm/mês, e o MRI-CGM3, para os meses de Junho e Dezembro, acima dos 38 mm/mês, seguidos do IPS-CM5A-MR, para o mês de Junho, com aproximadamente 47 mm/mês. Os demais modelos apresentaram variabilidade entre 10 e 30 mm/mês, ao longo de todo o ano (ver Figura 81, Apêndice A).

5.3.3 Estimativa da ETo por Hargreaves-Samani no cenário RCP4.5

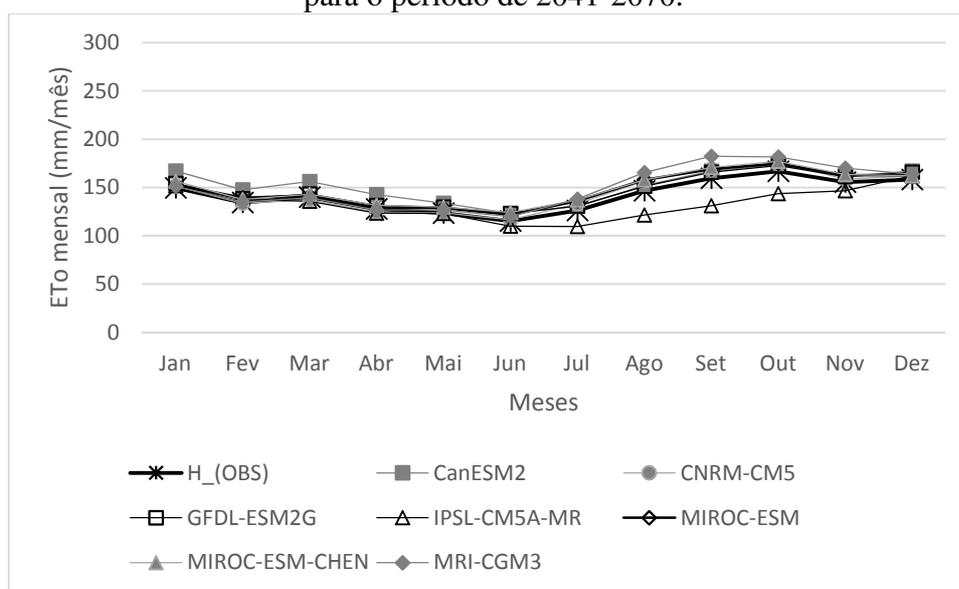
Pelo método de Hargreaves-Samani, as projeções de aumento para o período de 2011-2040 praticamente não ocorreram. Os valores de ETo mantiveram-se próximos à ETo do clima presente. No entanto, o modelo IPSL-CM5A-MR projetou isoladamente uma redução, variando, em média, de 7 a 20% no período de Junho a Novembro, sendo o maior percentual de Agosto a Outubro (ver Figura 82, Apêndice A).

Com relação à variabilidade, os modelos se mostraram dentro de um nível de

significância baixo, devido à oscilação dos valores entre 5 e 20 mm/mês, com a maioria dos modelos apresentando variação em torno dos 10 a 15 mm/mês ao longo do ano, exceto em Janeiro e Dezembro, que apresentaram mais de 21 mm/mês, o que foi indicado pelos modelos GFDL-ESM2G e CanESM2 (ver Figura 83, Apêndice A).

De 2041-2070, para o 1º semestre, apenas o modelo CanESM2 apresentou um percentual de aumento, por volta de 8% a 12%, de Janeiro a Maio. Para o 2º semestre, os modelos indicaram um ligeiro aumento, porém não expressivo, pois o maior registro de aumento se deu no mês de Setembro, por volta de 14%, registrado pelo MRI-CGM3. A exceção do 2º semestre foi pontuado pelo modelo IPSL-CM5A-MR, que, mais uma vez, indicou redução, alternando entre 6% e 18%, sendo o maior percentual de aumento para os meses de Agosto e Setembro, com 17% e 18%, respectivamente (Figura 46).

Figura 46 – ETo mensal estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.



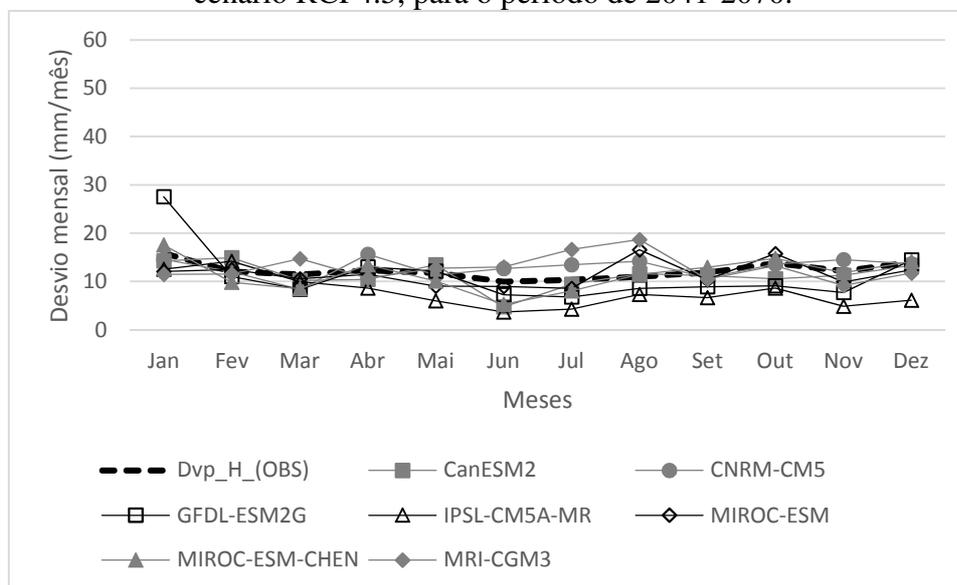
Fonte: Elaborado pelo Autor.

O maior desvio-padrão apontado, pouco mais de 27 mm/mês, foi indicado pelo modelo GFDL-ESM2G, em Janeiro. Para o período de Fevereiro a Maio, a variabilidade dos modelos, em média, oscilou entre 10 e 15 mm/mês. Em Janeiro, entre 11 e 18 mm/mês, e em Agosto, destacaram-se os modelos MRI_CGM3 e MIROC-ESM, com mais de 16 mm/mês, e de Setembro a Dezembro, com valores abaixo de 15 mm/mês para a maioria dos modelos.

No entanto, alguns modelos, como o IPSL-CM5A-MR e GFDL-ESM2G, indicaram variação abaixo dos 10 mm/mês de Junho a Novembro, com bom desempenho na representatividade da curva observada, porém com elevada subestimativa, principalmente o

IPSL-CM5A-MR (Figura 47).

Figura 47 – Desvio padrão mensal ETo estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No período 2071-2100, no 1º semestre, apenas o modelo CanESM2 projetou aumento, para os meses de Fevereiro, Março e Abril, com máximo de 20% registrado para Março. Os demais modelos para esse período praticamente não projetaram aumento da ETo, ou seja: apontando que se manteriam as mesmas características da ETo de clima presente.

Já para o 2º semestre, o aumento indicado pelos modelos se manteve no intervalo de 5% e 15% em Julho, e de menos de 12%, de Agosto a Dezembro. À exceção do modelo MRI-CGM3, com registros variando de 7 a 22%, entre Agosto a Novembro, sendo os maiores percentuais (acima de 20%) para os meses de Agosto e Setembro.

No 2º semestre, a única exceção de aumento ficou por conta do modelo IPSL-CM5A-MR, que apontou redução na ETo variando de 4% e 17%, de Julho a Novembro (ver Figura 84, Apêndice A).

Com relação à variabilidade da ETo em torno da média, percebeu-se que os modelos projetaram variabilidade maior no período de Janeiro a Maio, em sua maioria oscilando entre 15 e 16 mm/mês para Janeiro, e em média, de 10 a 16 mm/mês no período de Fevereiro a Maio.

Mesmo os modelos CanESM2 e MRI-CGM3 apresentando um desvio-padrão maior, não ultrapassaram os 18 mm/mês (Janeiro a Maio). No período de Junho a Dezembro, mesmo os maiores desvios-padrão não ultrapassaram os 19 mm/mês, e modelos como o IPSL-CM5A-MR e o GFDL-ESM2G apresentaram desvios-padrão abaixo de 10 mm/mês, em sua

maioria para o 2º semestre. Para este período, os desvios-padrão se apresentaram menores que no 1º semestre, ou seja, com menor variabilidade da ETo em torno da média, o que pode ser explicado pela menor variabilidade nas temperaturas nesse período (Figura 85, Apêndice A).

5.3.4 Estimativa da ETo por Hargreaves-Samani no cenário RCP8.5

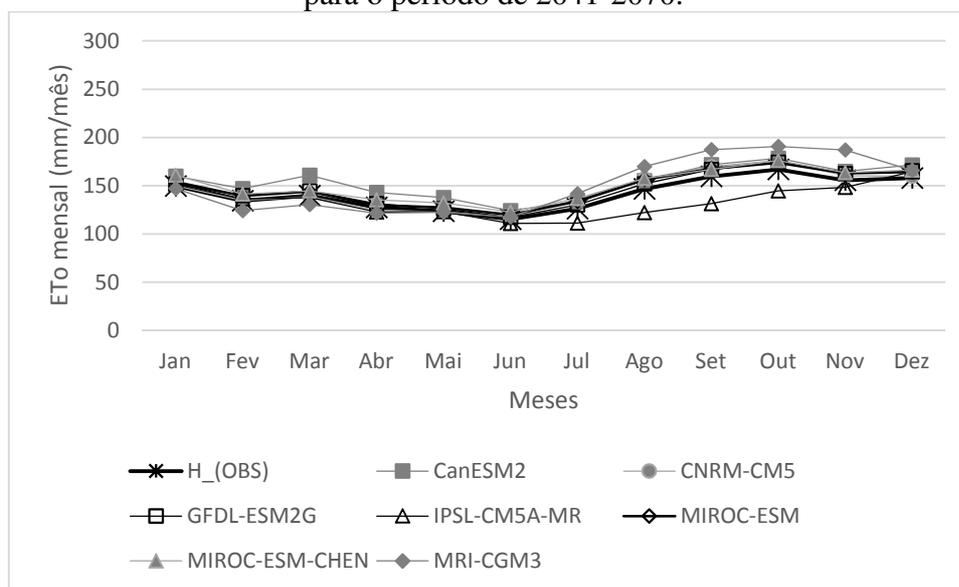
Para o período 2011-2040, as projeções de aumento apontadas pelos modelos, tanto no 1º semestre quanto no 2º, mantiveram-se com percentuais muito baixos, em média, menores que 4%. As exceções foram um pico de aumento de 12,4% para o mês de Março, projetado pelo modelo CanESM2, e os modelos MRI-CGM3 e IPSL-CM5A-MR, que projetaram redução da ETo no 1º semestre de 1% a 6%. No 2º semestre, o modelo IPSL-CM5A-MR manteve sua projeção de redução com percentual não ultrapassando os 19% (Figura 86, Apêndice A).

Com relação à variabilidade da ETo em torno da média, percebeu-se que os modelos projetaram variabilidade maior no período de Janeiro a Maio, oscilando entre 12 e 23 mm/mês para Janeiro, e entre 7 e 18 mm/mês de Fevereiro a Maio. Diferentemente do período de Junho a Novembro, onde os maiores desvios-padrão não ultrapassam os 18 mm/mês, e para Dezembro, com variabilidade de aproximadamente 21%. Os menores desvios-padrão foram registrados pelo modelo IPSL-CM5A-MR, menores que 10 mm/mês, mostrando com isso, no 2º semestre, menor variabilidade da ETo em torno da média, embora subestimando a variabilidade da ETo observada (Figura 87, Apêndice A).

Para o período de 2041-2070, os modelos citados para o período anterior (2011-2040) mantiveram suas projeções de aumento e/ou redução. O modelo CanESM2 indicou aumento da ETo de Janeiro a Junho, embora com pequena expressão, pois o maior percentual foi projetado para Março (por volta de 15%).

Os modelos MRI-CGM3 e IPSL-CM5A-MR projetaram redução da ETo no período de Março e Abril de 1% a 4% (IPSL-CM5A-MR) e, de 1 a 8% (MRI-CGM3) de Janeiro a Maio. No 2º semestre, o modelo IPSL-CM5A-MR manteve sua projeção de redução com percentual não ultrapassando os 18% (Agosto a Outubro). Todavia, o modelo MRI-CGM3 projetou aumento entre 12% (para Agosto) e 20% (Novembro). Os demais modelos apontaram, para o 2º semestre, alterações não-significativas na ETo, menores que 7% (Figura 48).

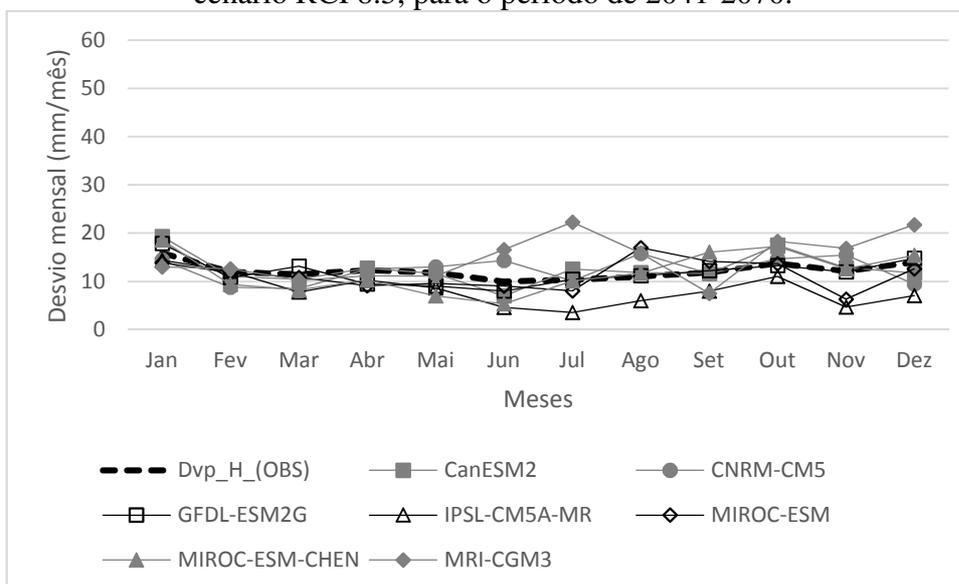
Figura 48 – ETo mensal estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O maior desvio-padrão projetado foi do modelo MRI-CGM3, para Julho e Dezembro (acima dos 21 mm/mês), porém Janeiro registrou os maiores desvios-padrão dentre os meses do ano, o que foi sinalizado por todos os modelos. Assim, os demais meses do ano para a maioria dos modelos mantiveram variabilidade em torno da média (menor que 15 mm/mês). Nesse período, os modelos registraram bom desempenho em relação ao desvio-padrão observado, muito embora com pequena subestimativa (Figura 49).

Figura 49 – Desvio-padrão mensal da ETo estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No período 2071-2100, os modelos citados nos períodos 2011-2040 e 2041-2070 mantiveram suas projeções de aumento e/ou redução, apresentando aumento mais significativo apenas os modelos CanESM2 (1º semestre) e MRI-CGM3 (2º semestre). O CanESM2 projetou aumento de 18% a 31%, com o pico em Março. Nesse 1º semestre, o modelo MRI-CGM3 sinalizou redução de 2% a 7% no período de Fevereiro a Abril. A partir de Junho, o mesmo modelo projetou aumento de 10% a 29%, sendo que o maior aumento foi para os meses de Outubro e Novembro, ambos acima dos 28 mm/mês.

Os demais modelos mantiveram suas projeções de aumento, variando de 7 a 13% em relação à ETo de clima presente. No entanto, o modelo IPSL-CM5A-MR manteve projeção de redução da ETo entre Julho e Outubro, com maior redução para Setembro (cerca de 15%). Assim sendo, é possível perceber que as alterações climáticas previstas pelos modelos do CMIP5 impactarão de maneira diferente a ETo.

Portanto, pode-se deduzir que a maioria dos modelos são unânimes em indicar que, até o final deste século, a ETo sofrerá leve aumento percentual, ainda que não muito significativo (Figura 88, Apêndice A). Nesse período, a concentração dos maiores desvios-padrão foram para os meses de Dezembro e Janeiro, variando entre 14 e 23 mm/mês para Janeiro, e entre 6,3 e 19,3 mm/mês para Dezembro. Este valor de 6,3 mm/mês estava associado ao IPSL-CM5A-MR, com os demais oscilando entre 7 e 18 mm/mês (Janeiro a Maio).

No 2º semestre, os modelos apresentaram maior variabilidade em relação à ETo observada, tendo o IPSL-CM5A-MR registrado grande subestimativa, quando comparado à variabilidade da ETo observada. De maneira geral, os modelos, exceto GFDL-ESM2G, ao longo do ano mantêm uma variabilidade em torno da média. Mesmo com o desvio-padrão não ultrapassando os 20 mm/mês, os modelos mostraram ser grande a dificuldade de representar a variabilidade da ETo observada e/ou de clima presente (ver Figura 89, Apêndice A).

5.3.5 Estimativa da ETo por Penman-Monteith FAO56 considerando velocidade do vento constante no cenário RCP4.5

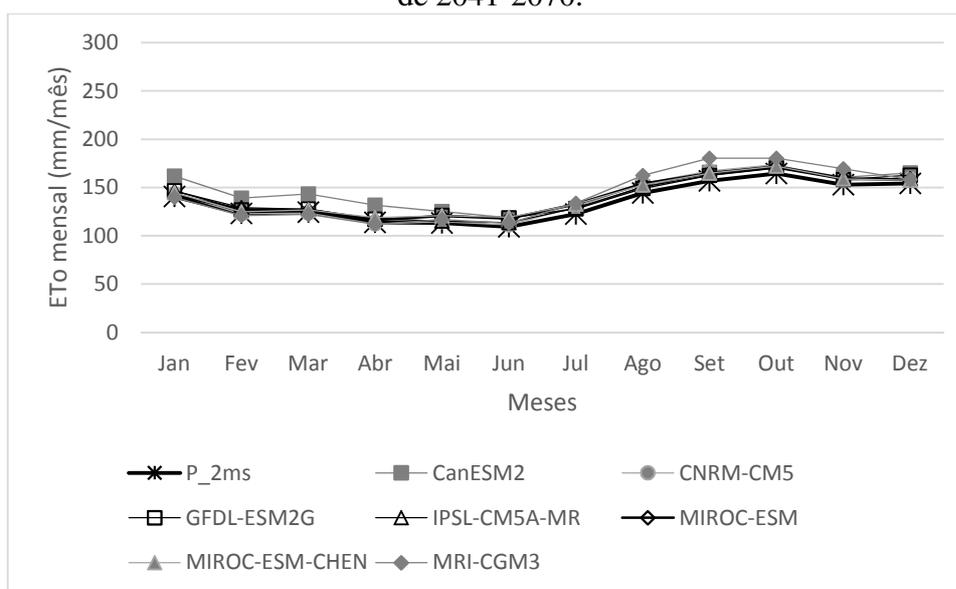
Quando o vento foi considerado com velocidade constante de 2m/s, os modelos projetaram aumento e/ou diminuição de caráter leve, mantendo-se praticamente com o padrão da ETo no clima presente (P_2ms), mostrando um aumento próximo dos 12%, apontado pelo CanESM2 no mês de Março, seguido de uma diminuição de cerca de 3% no mesmo mês, apontado pelo MRI-CGM3.

No 2º semestre, todos os modelos projetaram leve aumento, não ultrapassando os

5% (Figura 90, Apêndice A). Nesse período, o maiores desvios-padrão em relação à média foram registrados pelos modelos GFDL-ESM2G e CanESM2 em Janeiro e Dezembro (25 mm/mês). Os modelos indicaram que a variabilidade vai diminuindo a partir de Janeiro, chegando a seu menor valor em Novembro, onde registraram mínimo de 6,8 mm/mês e máximo de 13,5 mm/mês. Assim sendo, houve uma tendência de diminuição do 1º para o 2º semestre, chegando-se aos menores valores em Novembro (ver Figura 91, Apêndice A).

Para o período de 2041-2070, apenas os modelos CanESM2 e MRI-CGM3 projetaram aumento mais expressivo. No 1º semestre, CanESM2 para Janeiro a Abril, variou de 13 a 15%, e para Maio e Junho, de 8 a 11%. No 2º semestre, o modelo MRI-CGM3 projetou aumento, variando de 9 a 15% de Julho a Novembro. Os demais modelos indicaram leve aumento, principalmente no 2º semestre, no máximo de 6,4% (Figura 50).

Figura 50 – ETo mensal estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.

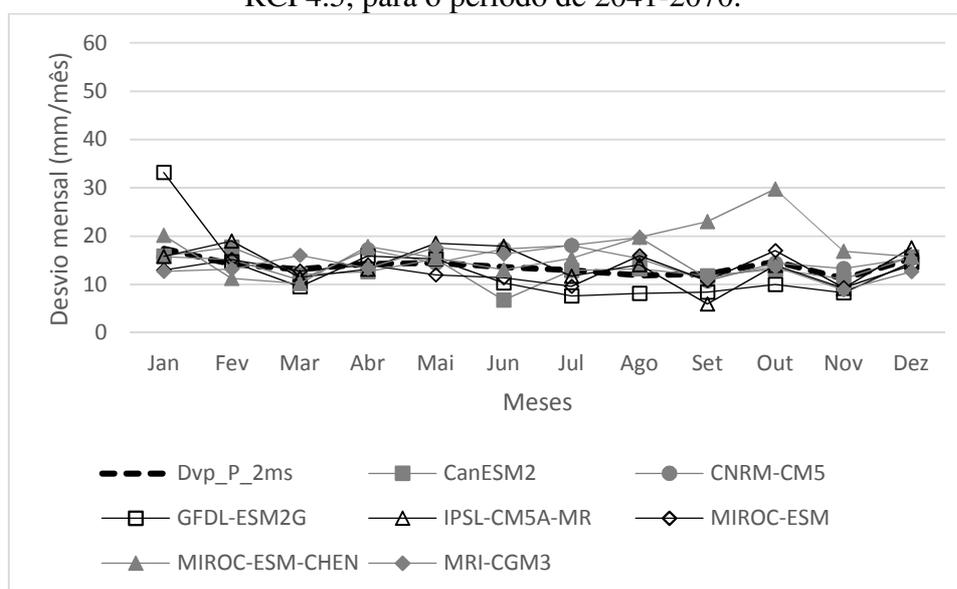


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em relação ao desvio-padrão da ETo em torno da média, os maiores valores encontrados foram para os meses de Janeiro (34 mm/mês, GFDL-ESM2G), e Outubro (acima dos 29 mm/mês, MIROC-ESM-CHEN). Os demais modelos registraram uma variabilidade entre 10 e 20 mm/mês, para Fevereiro a Maio e Junho a Dezembro, de entre 5 e 20 mm/mês.

No 1º semestre, os desvios-padrão, com exceção do GFDL-ESM2G em Janeiro, mantiveram melhor desempenho em relação ao desvio-padrão de clima presente. No 2º semestre, a variabilidade se apresentou bem maior, ora superestimando, ora subestimando os valores (Figura 51).

Figura 51 – Desvio-padrão mensal da ETo estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para o período 2071-2100, os modelos mantiveram-se praticamente com as mesmas projeções do período 2041-2070. A única diferença pode ser notada em relação ao CanESM2, por apresentar um aumento concentrado, próximo de 26%, para o mês de Março, e o modelo MRI-CGM3, que apresentou, para o 2º semestre, um aumento de 14 a 23%, de Julho a Novembro, com pico em Setembro, próximo de 23% (Figura 92, Apêndice A).

Em relação ao desvio-padrão, os maiores valores projetados pelos modelos foram para Janeiro, Fevereiro e Março (CanESM2), acima dos 18 mm/mês, Junho (IPSL-CM5A-MR), assim como Junho e Julho para CNRM-CM5, registrando pouco mais de 20 mm/mês. Para os demais modelos, de Janeiro a Maio os resultados oscilaram entre 9 e 20 mm/mês, e de Junho a Novembro, de 6 a pouco menos de 20 mm/mês (ver Figura 93, Apêndice A).

5.3.6 Estimativa da ETo por Penman-Monteith FAO56 considerando velocidade do vento constante no cenário RCP8.5

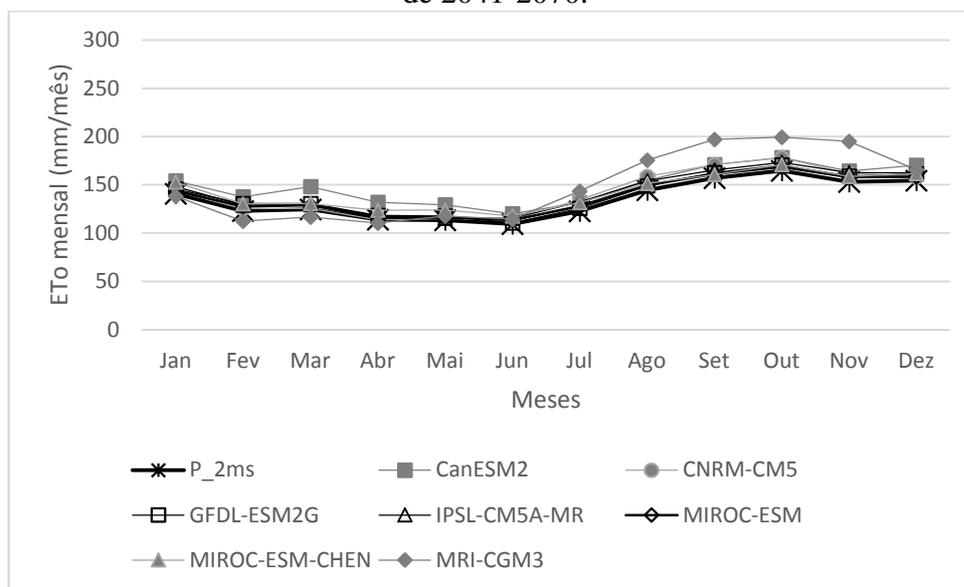
As projeções de aumento para o RCP8.5 diferem minimamente do mesmo período do cenário anterior (RCP4.5), com um aumento de apenas 15,3%, projetado pelo CanESM2 para o mês de Março. No 2º semestre, as projeções de aumento não ultrapassaram os 9% no período de Agosto a Novembro, projetado pelo modelo MRI-CGM3. Logo, percebeu-se que, para esse período, em ambos os RCPs, os modelos não projetaram elevação significativa da ETo (ver Figura 94, Apêndice A).

Apesar das projeções da ETo em relação ao clima presente não se mostrarem expressivas, o desvio-padrão, para a maioria dos modelos, manteve-se variando, em média, entre 10 e 20 mm/mês, exceto Janeiro pelo GFDL-ESM2G (acima dos 27 mm/mês), e Dezembro pelo CanESM2 (com 24 mm/mês). O modelo MIROC-ESM-CHEN, de Junho a Novembro, apontou entre 7 e 10 mm/dia (Figura 95, Apêndice A). Poucos modelos conseguiram representar o padrão de variabilidade da ETo observada, apresentando sub e/ou superestimativa.

Para o período 2041-2070, as projeções de aumento expressivo foram apontadas pelo CanESM2 para Março (por volta dos 19%), e pelo MRI-CGM3 no 2º semestre, para os meses de Agosto a Novembro (de 21% a 27%), e para Dezembro de pouco mais de 7%, em relação ao clima presente.

Para os demais modelos, no 2º semestre as projeções de aumento não ultrapassaram os 10%, enquanto que, no 1º semestre, o aumento projetado foi menor que 9%, à exceção do MRI-CGM3, que projetou uma redução menor que 9% para Fevereiro, enquanto os demais meses mantiveram-se com projeção variando de 1% a 6%, ou seja: próximos da média de clima presente (Figura 52).

Figura 52 – Eto mensal estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.

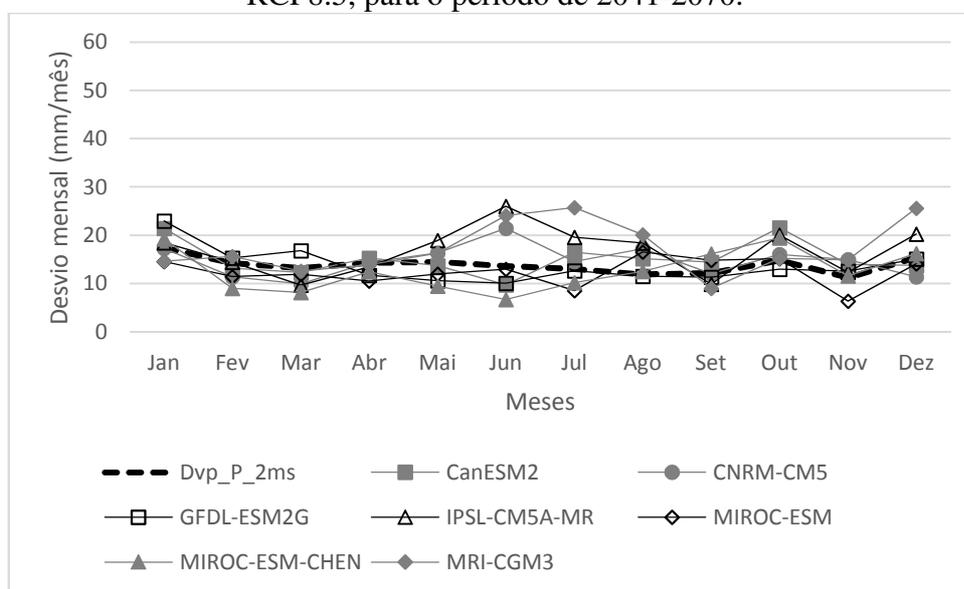


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Dois modelos apontaram grande variabilidade na ETo ao longo do ano, de Maio a Julho, o IPSL-CM5A-MR, com pico de 26 mm/mês em Junho, e o MRI-CGM3, de Junho a Agosto, acima dos 20 mm/mês, e em Julho e Dezembro, com máximo de 26 mm/mês. O menor

desvio projetado (6,7 mm/mês) foi registrado pelo MIROC-ESM-CHEN em Junho, de 6,4 mm/mês em Novembro pelo MIROC-ESM (Figura 53).

Figura 53 - Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

De 2071-2100, os modelos que projetaram aumentos mais expressivos para o período 2041-2070 mantiveram suas projeções de aumento, mas com um maior percentual quando comparado ao período anterior. Comparando-os com o clima presente, percebeu-se que o CanESM2, no 1º semestre, apresentou aumento de 17% (Junho) a pouco mais de 39%, com os maiores valores correspondentes a Março e Abril (acima de 32%).

No 2º semestre, os maiores percentuais de aumento foram registrados de Agosto a Novembro, sendo o maior registro em Setembro (38%), Julho com 33% e Dezembro com 20%. No 1º semestre, as projeções de aumento dos demais modelos variaram, sem ultrapassar os 15%, exceto o MRI-CGM3 que manteve sua projeção de diminuição da ETo, com aproximadamente 7% para Fevereiro.

Todavia, no 2º semestre, as projeções registradas pelos modelos apresentaram leve variação, não superando os 16% em relação a ETo de clima presente (ver Figura 96, Apêndice A). Os modelos que apresentaram maiores desvios foram o GFDL-ESM2G para Janeiro (30 mm/mês), seguidos de IPSL-CM5A-MR, para Abril e Junho (acima de 25 mm/mês) e o MRI-CGM3 em Junho (desvio-padrão acima dos 24 mm/mês). Nos demais modelos, foi possível notar que a variabilidade oscilou entre 6 e 20 mm/mês (Figura 97, Apêndice A).

Caso, de fato, se confirmem as projeções de aumento na concentração de CO₂, os

modelos não são unânimes em apontar aumento significativo da ETo. Apenas um ou dois modelos apontaram que a ETo sofrerá elevação mais expressiva entre 2041-2100, para os dois cenários RCPs analisados.

Apenas o modelo IPSL-CM5A_MR projetou diminuição da ETo, pelo método de Hargreaves-Samani. Para os demais modelos e métodos de estimativa, a ETo apresentará baixa variação de aumento e/ou redução. O cenário RCP8.5 mantém-se com maior percentual de aumento em comparação ao RCP4.5, e o período de maior projeção de aumento é o de 2041-2100.

De acordo com os resultados da ETo apresentados logo acima, nos três métodos utilizados, foi aplicado o teste de hipótese da diferença de médias, e pôde-se constatar que as diferenças entre as médias da ETo de clima presente e das projeções dos modelos, foram consideradas estatisticamente significativas quando apresentaram as seguintes relações percentuais:

De 2011-2040, para o método de Penman-Monteith FAO56, quando a diferença foi maior que 8,5%, para Penman-Monteith-FAO56 com velocidade de 2ms maior que 6% e para Hargreaves-Samani, acima de 5,5%.

De 2041-2070, para o método de Penman-Monteith FAO56, quando a diferença foi maior que 6,8%, para Penman-Monteith-FAO56 com velocidade de 2ms maior que 5,2% e para Hargreaves-Samani, acima de 4,6%.

De 2071-2100, para o método de Penman-Monteith FAO56, quando a diferença foi maior que 8%, para Penman-Monteith-FAO56 com velocidade de 2ms maior que 5,1% e para Hargreaves-Samani, acima de 5%.

5.3.7 Breve comentário sobre os resultados

As projeções futuras foram baseadas nas simulações de sete modelos climáticos globais mais recentes, da Fase 5, conforme dispostos na Tabela 2. Tornou-se possível, através dos mesmos, fazer uma discussão relevante no que diz respeito ao conhecimento antecipado do comportamento da ETo, quando esta, junto com a precipitação, é uma das variáveis mais importantes para o setor de Recursos Hídricos.

Analisando períodos semestrais, os cenários projetaram aumento da ETo, tanto no RCP4.5 quanto no RCP8.5, até o final do século XXI, ressalvados alguns modelos que indicaram diminuição da ETo.

Para o período 2011-2040, o percentual de aumento apontado pela maioria dos

modelos, nos três métodos empregados, oscilou em torno dos 10%, com os outros mantendo praticamente o mesmo padrão observado, principalmente para o 1º semestre, variando de 1% a 5%.

Para 2041-2070, o aumento se caracterizou com bem pequeno quando comparado ao período anterior (2011-2040). O que chama a atenção está no fato de que, quando se considera a velocidade do vento constante de 2m/s, os valores encontrados em P_2ms se assemelham aos encontrados pelo método de Hargreaves-Samani, em ambos os cenários avaliados.

Para o período 2071-2100, notou-se que ambos os cenários de mudanças climáticas apontam aumento mais evidente da ETo até o final do século XXI, principalmente o cenário RCP8.5, porém com pouca expressão entre os modelos, quando comparados ao clima presente. Os maiores percentuais de aumento referiram-se aos meses mais secos do ano (Julho a Dezembro), visto pelo modelo MRI-CGM3 com P_(OBS) de Julho a Dezembro, com um aumento entre 22 e 55%, sendo de Agosto a Novembro acima dos 50%. Com P_2ms, a projeção de aumento foi menor – de Setembro a Outubro, acima dos 38%.

Já para H_(OBS), esse aumento foi projetado para o 2º semestre como sendo entre 15 e 30%, sendo máximo em Outubro. Em compensação, esse modelo projetou redução não significativa da ETo para o 1º semestre, de menos de 10% em alguns períodos.

Outro modelo que projetou os maiores aumentos da ETo foi o CanESM2, para o 1º semestre de 2071-2100, no cenário RCP8.5, com P_(OBS) de Janeiro a Junho variando entre 21 e 48%, sendo máximo para Março (48%) e Abril (42%). Com P_2ms, para Março, de 39%, e por H_(OBS), oscilando de 13 a 31%, sendo máximo para Março (31%).

No 2º semestre, apenas o IPSL-CM5A-MR projetou redução da ETo, não ultrapassando os 20%, apontado por H_(OBS), nos dois cenários RCPs e para os três períodos futuros. Os demais modelos, em sua maioria, não indicaram aumento expressivo da ETo, variando de 2 a 15% para o 2º semestre, e menos de 10% para o 1º semestre.

Esse pequeno aumento pode estar associado ao aumento nas variáveis envolvidas no processo de estimativa da ETo, tais como a temperatura, conforme relatado em diversos trabalhos, que apontam crescimento de até 3° C até o final do século.

Para os meses de Janeiro a Junho, período mais úmido, os modelos projetaram aumento pouco significativo da ETo entre os dois cenários RCP4.5 e RCP8.5, ou seja: os resultados mantem-se bem próximos aos encontrados pelo clima presente (1976-2005), com meses indicando aumento por volta de 10%. Isto indica que as alterações climáticas previstas até o final do século XXI não impactarão significativamente nos meses mais úmidos da região,

e sim, nos meses mais secos.

O método de Penman-Monteith FAO56 foi o que apresentou maiores totais de ETo em relação aos demais. No entanto, pode-se afirmar que os modelos não são unânimes em indicar aumento da ETo até o final do século XXI. Vale lembrar que essa afirmação pode sofrer variação devido às incertezas dos modelos.

Notou-se ainda que, no período 2011-2040, a variabilidade de aumento da ETo projetada foi bem menor quando comparada ao período 2041-2100, indicando que as mudanças climáticas na ETo deverão ser mais adversas a partir de 2040. Ressalta-se, no entanto, que já existem sinais contundentes de que o cenário é de precaução e de elaboração de estratégias dos tomadores de decisão, planejamento de políticas públicas, pensando a médio e longo prazos nos impactos causados por esse aumento no setor de recursos hídricos e nos diversos setores da sociedade.

Por mais que as projeções sejam baixas, se esses cenários de aumento da ETo persistirem até o final do século XXI, principalmente pela elevação das temperaturas, isto apontará uma tendência para um clima mais seco, acarretando na diminuição a umidade no solo e do excedente hídrico. O excedente de água será reduzido, o que terá um impacto sobre as águas subterrâneas e, conseqüentemente, sobre os níveis de reservatórios de água, fazendo com que a irrigação torne-se muito restrita.

Além do mais, haverá maior probabilidade de aumento do risco de ondas de calor e incêndios florestais, intensificando as secas e, em consequência, a evapotranspiração potencial, tendo como resultado impactante o aumento da procura e o consumo de água nos diversos setores: industrial, humano, agricultura, pecuária, dentre outros.

Diante desse contexto, há um número de novas incertezas que podem afetar os resultados desse trabalho no cenário de mudanças climáticas até o final do século XXI. Estas incluem, por exemplo: projeções de aumento das temperaturas, e conseqüentemente, o aumento de secas severas; mau uso da terra; o processo de desertificação; variação das precipitações, dentre outros.

Todos esses fatores combinados podem afetar diretamente os níveis de ETo. Por isso, a sugestão é de que trabalhos futuros possam incorporar todos esses fatores, e com isso, estimar a ETo até o final do século XXI. Estar de posse desse conhecimento é de suma importância para a tomada de decisão no processo de gerenciamento dos recursos hídricos, tendo como principal benefício a minimização dos efeitos adversos provocados pelos fatores climáticos numa região castigada climatologicamente.

Portanto, diante dos resultados encontrados, avaliar os impactos das mudanças

climáticas sobre uma determinada região torna-se uma tarefa bastante desafiadora, porque projeções futuras são incertas, devido aos desafios inerentes ao clima (com alterações naturais e imprevisíveis) e aqueles inerentes ao comportamento humano.

Logo, de acordo com Hayhoe *et al.* (2013), compreender a resposta do clima da Terra para os gases do efeito estufa, e prever a variabilidade dos ciclos naturais dentro do sistema terrestre, torna-se um imenso desafio, pois tudo isso tem forte influência sobre o clima local. Ainda segundo este autor, apesar de desafiador, a avaliação dos impactos do clima deve ser feita com bastante cautela e atenção, porque a informação gerada pode ser valiosa para o planejamento ou políticas de curto médio e longo prazo.

No caso do Estado do Ceará, mesmo com uma grande infraestrutura voltada ao setor de recursos hídricos, com grandes reservatórios (como Castanhão, Orós, Banabuiú, dentre outros) totalmente interligados, o conhecimento do impacto das mudanças climáticas na ETo auxilia profundamente os gestores públicos no gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente nas tomadas de decisão.

Outra informação relevante que pôde ser apreendida com a análise dos resultados está voltada para as políticas públicas ligadas aos sistemas naturais, pois se baseiam no pressuposto de que o clima é relativamente estável, muito embora os resultados do CMIP5 não confirmem esta estabilidade climática.

Assim sendo, se o clima não é mais estável, estes sistemas (gestores, políticas públicas) terão de se adaptar. A adaptação a essas mudanças pode custar muito caro aos cofres públicos, mas planejar com antecedência pode reduzir consideravelmente esses custos.

Por exemplo, como já foi projetado um aumento da ETo, apesar de pequeno, já a partir de 2011, essa informação pode ser incorporada ao gerenciamento dos recursos hídricos nos diversos setores: irrigação, outorga, liberação e captação de água para indústria e consumo humano, e para os mais diversos fins.

Além disso, essa informação ainda pode ser incorporada ao planejamento das atividades da Secretaria de Desenvolvimento e Combate à Seca, requerendo políticas de construção de novos reservatórios, por fim, minimizando grandes perdas socioeconômicas no Estado do Ceará.

A seguir, serão avaliados os impactos das mudanças climáticas no setor de recursos hídricos, em especial nas vazões afluentes da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe.

5.4 Verificação da relação entre as Evapotranspirações Potenciais ETPs dos métodos de Penman-Monteith FAO56 e Hargreaves-Samani, para fins de obter a relação Penman-Monteith FAO56 em função de Hargreaves-Samani no cenário de mudanças climáticas

5.4.1 Escolha dos períodos para análise da VMP

Como mencionado anteriormente, a fim de verificar correlação entre a ETo estimada por Hargreaves-Samani com a ETo estimada por Penman-Monteith,FAO56 foi necessária a aplicação de um modelo de regressão linear, onde foi possível, além da visualização da equação da reta de regressão em diversos períodos, também obter o coeficiente de regressão (R^2).

Assim, para afirmar o elevado grau de correlação encontrado entre os diferentes períodos, e detectar o menor grau de incerteza dos métodos empregados, foi aplicada a *Variância Média de Predição* (VMP), indicando que, quanto menor o valor encontrado, melhor relação entre os dois métodos, e menor a incerteza na estimativa da ETo.

A escolha dos melhores períodos, como dito anteriormente, foram selecionados de acordo com o menor valor da VMP e o 2º semestre, devido a ETo mensal permanecer quase sempre maior que a precipitação nesse período. Lembrando os períodos escolhidos, conforme definidos abaixo:

I - Primeiro período: Janeiro e Junho, com $R^2 = 0,8406$ e $VMP = 139,5308$;

II - Segundo período: compreende a quadra chuvosa de Fevereiro a Maio, com $R^2 = 0,8324$ e $VMP = 140,4779$; e

III - Terceiro período: Julho a Dezembro (2º semestre), com $R^2 = 0,7327$ e $VMP = 445,9760$.

Diante deste contexto, como foi possível identificar elevadas correlações entre os dois métodos, com as equações originadas para cada período, tornou-se possível a transformação de ETo estimada por Hargreaves-Samani, (oriunda dos modelos climáticos, após corrigidos pela distribuição Gama) em ETo como estimada por Penman-Monteith FAO56.

Isto significa que essa relação possibilita obter Penman-Monteith FAO56 em função de Hargreaves-Samani (P(H)). Outro ganho com essa aplicação está na correção das possíveis incertezas associadas às variáveis simuladas pelos modelos climáticos, principalmente nas utilizadas pelo método de Penman-Monteith FAO56. Assim, como os modelos climáticos não

apresentam um bom desempenho em relação a algumas variáveis, como, por exemplo, velocidade do vento, a aplicação dessa metodologia permite suavizar estas incertezas, tanto para o presente quando para o futuro.

O método de Penman-Monteith FAO56, por envolver mais variáveis que possivelmente melhor representam o processo de evapotranspiração, se torna mais completo em relação aos outros métodos, sendo sugerido como método padrão de estimativa da ETo (Allen *et al.*, 1998). Com base nessa informação, ao conseguir representar os resultados desse método em função de outros que necessitam apenas da temperatura (como o método de Hargreaves-Samani), variável esta melhor representada pelos modelos climáticos, traz um ganho de informação bastante significativo na estimativa da ETo, além de tornar-se uma informação mais segura para pesquisas que envolvam diretamente a influência da ETo, nos campos de irrigação, abastecimento humano, e de recursos hídricos em geral.

Sabendo-se da grande incerteza nos dados dos modelos globais, para contornar a baixa representatividade da ETo obtida com dados modelados quando comparada a ETo observada, foi necessária a aplicação da correção Gama, além do modelo de regressão, com auxílio da Variância Média de Predição. Para tanto, foram escolhidos três períodos, como já citados anteriormente.

Cada equação foi utilizada nos dados corrigidos da ETo estimada pelo método de Hargreaves-Samani, a fim de obter o método de Penman-Monteith FAO56 P(H), primeiramente para o período histórico ou clima presente (1976-2005) e, em seguida, para cada período futuro analisado (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100).

Devido à possível incerteza em relação às variáveis envolvidas na estimativa da ETo pelo método de Penman-Monteith FAO56 (como mencionado acima), foi verificada a correlação entre a ETo estimada por P(H) e Penman-Monteith FAO56 do modelo corrigido (P_Cor.1), com o intuito de analisar o grau de correlação entre os dois métodos, tendo sido detectada uma alta correlação. Com exceção do modelo IPSL-CM5A-MR, os demais modelos apresentaram correlações de R^2 variando entre 0,7 a 0,9 (ver Tabela 22).

Quando analisadas as correlações entre P(H) e P_Cor.1, foi possível perceber que essa relação apresentou um coeficiente de correlação elevado (Tabela 22), mostrando que as possíveis incertezas nas variáveis exigidas pelo método de Penman-Monteith FAO56 podem ser evitadas ao se adotar o método de Hargreaves-Samani, uma vez que é função apenas da temperatura, variável esta que apresenta melhor desempenho nos modelos.

Mais adiante, serão mostradas as estatísticas (média e desvio-padrão) entre P_(OBS) e P(H), no intuito de obter uma relação estatística satisfatória em relação à ETo

observada.

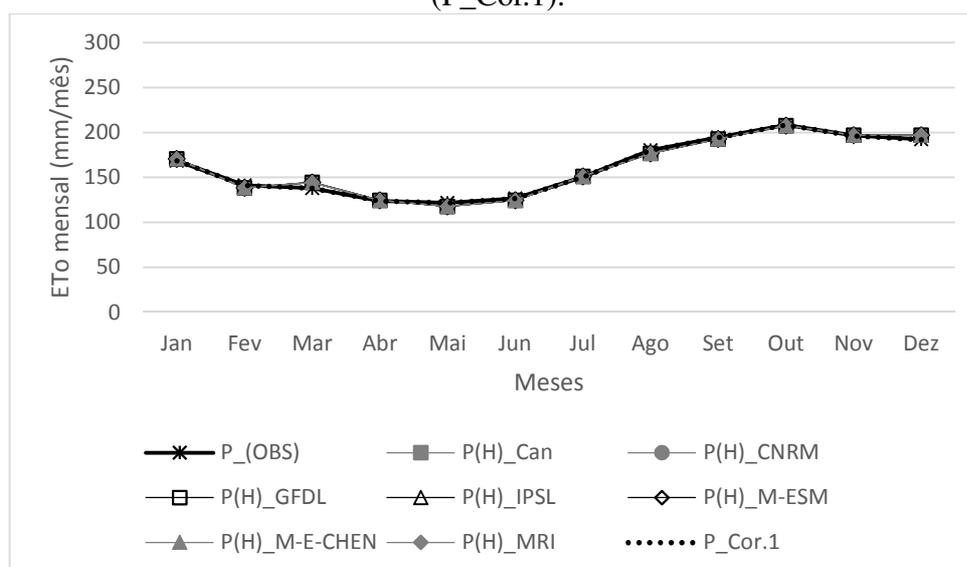
Tabela 22 – Resultados das correlações entre o método de Penman-Monteith FAO56 obtido em função de Hargreaves-Samani (P(H)) e Penman-Monteith FAO56 corrigido (P_Cor.1).

P(H) x P_Cor.1	Janeiro a Junho	Fevereiro a Maio	Julho a Dezembro
P(H)_Can	0,8984	0,8995	0,6739
P(H)_CNRM	0,8708	0,7398	0,8797
P(H)_GFDL	0,8629	0,8628	0,6963
P(H)_IPSL	0,5664	0,4361	0,5195
P(H)_M-ESM	0,8621	0,8798	0,8303
P(H)_M-E-CHEN	0,8998	0,8349	0,8559
P(H)_MRI	0,8698	0,8933	0,8835

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Analisando a Figura 54, correspondente ao período de clima presente (1976-2005), após todos os procedimentos estatísticos, percebeu-se um bom desempenho dos modelos na estimativa da ETo em relação à ETo observada (P_(OBS)). Este bom desempenho reforça a informação de que os modelos mantêm uma base histórica confiável, e assim, podem ser utilizados nos cenários futuros de mudanças climáticas.

Figura 54 – ETo média, estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56, obtida em função de Hargreaves-Samani (P(H)), para todos os modelos do CMIP5 no período histórico (1976 – 2005), em comparação entre a estimada com dados observados P_(OBS) e dados corrigidos (P_Cor.1).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Reforçando a informação mostrada na Figura 54, os dados mostrados na Tabela 23 indicam que a variação da ETo mensal simulada pelos modelos apresentou pequena variação

mês a mês, em relação à P_(OBS), podendo ser considerada como não-significativa. Assim, os resultados apresentados pelos modelos são considerados como excelentes para o período de clima presente.

Tabela 23 – Valores da ETo média estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56, obtido em função de Hargreaves-Samani (P(H)), para todos os modelos do CMIP5 no período histórico (1976 – 2005), em comparação com a estimada com dados observados P_(OBS).

	P_(OBS)	P(H)_ Can	P(H)_ CNRM	P(H)_ GFDL	P(H)_ IPSL	P(H)_ M-ESM	P(H)_ M-E-CHEN	P(H)_ MRI
JAN	168,6	170,7	170,7	170,7	170,7	170,7	170,7	170,7
FEV	141,4	138,3	138,3	138,3	138,3	138,3	138,3	138,3
MAR	138,2	144,7	144,6	144,6	144,6	144,6	144,6	144,6
ABR	124	124,5	124,5	124,5	124,5	124,5	124,5	124,5
MAI	121,8	117,7	117,7	117,7	117,7	117,7	117,7	117,7
JUN	126,8	124,6	124,6	124,6	124,6	124,6	124,6	124,6
JUL	150,7	151,3	151,3	151,3	151,3	151,3	151,3	151,3
AGO	180,4	176,8	176,8	176,8	176,8	176,8	176,8	176,8
SET	194,5	192,8	192,8	192,8	192,8	192,8	192,8	192,8
OUT	208,6	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9
NOV	196,5	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1
DEZ	192,3	196,9	196,9	196,9	196,9	196,9	196,9	196,9

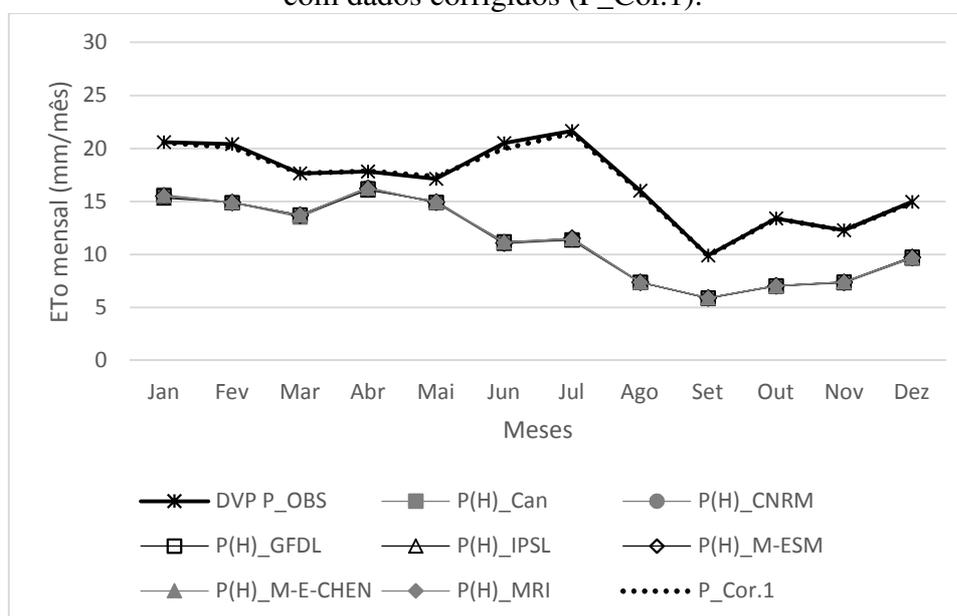
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Analisando a variabilidade da ETo em relação à média, verificou-se que, com os dados observados (DVP P_OBS), a maior variabilidade da ETo ocorreu em Janeiro, com pouco mais de 20,6 mm/mês, e em Julho, com cerca de 21,6 mm/mês. Já a menor variabilidade ocorreu no mês de Setembro, com aproximadamente 10 mm/mês (Tabela 24).

Os meses do 1º semestre apresentaram, em média, variabilidade maior do que no 2º semestre, ocasionada pela influência do período chuvoso, que afeta as temperaturas, a velocidade do vento e umidade relativa do ar. Apesar da dificuldade dos modelos em acompanhar o desvio-padrão da ETo observada, com a aplicação da distribuição Gama, apenas com dados corrigidos P_Cor.1, os modelos foram capazes de manter praticamente o mesmo padrão da variabilidade observada (DVP P_OBS), conforme mostra a Figura 55.

Essa subestimativa em relação ao (DVP P_OBS) representa um percentual para os meses do ano, na seguinte ordem: Janeiro (24,27% a 25,73%), Fevereiro (26,73%), Março (22,16% a 26,29%), Abril (8,43% a 9,55%), Maio (12,28% a 12,86%), Junho (45,36% a 46,34%), Julho (46,76% a 47,68%), Agosto (53,75%), Setembro (40,40%), Outubro (47,01% a 47,76%), Novembro (39,84% a 40,65) e Dezembro (34,67% a 35,33%).

Figura 55 – Desvio-padrão da ETo média, estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 obtido em função de Hargreaves-Samani (P(H)), para todos os modelos do CMIP5 no período histórico (1976 – 2005), em comparação entre a estimada com dados observados P_(OBS) e com dados corrigidos (P_Cor.1).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 24 – Valores dos desvios-padrão da ETo média estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 obtido em função de Hargreaves-Samani (P(H)), para todos os modelos do CMIP5 no período histórico (1976 – 2005), em comparação à estimada com dados observados P_(OBS).

	P_(OBS)	P(H)_ Can	P(H)_ CNRM	P(H)_ GFDL	P(H)_ IPSL	P(H)_ M-ESM	P(H)_ M-E-CHEN	P(H)_ MRI
JAN	20,6	15,6	15,5	15,5	15,3	15,5	15,6	15,5
FEV	20,4	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9
MAR	17,6	13,5	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7
ABR	17,8	16,1	16,3	16,2	16,1	16,2	16,2	16,2
MAI	17,1	14,9	14,9	14,9	15,0	14,9	14,9	15,0
JUN	20,5	11,0	11,2	11,2	11,1	11,1	11,2	11,1
JUL	21,6	11,3	11,5	11,4	11,4	11,5	11,5	11,5
AGO	16,0	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
SET	9,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
OUT	13,4	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,1
NOV	12,3	7,3	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
DEZ	15,0	9,7	9,8	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como mostrado anteriormente, a relação entre P(H) com P_(OBS) produziu uma estatística média para a ETo semelhante à de clima presente. Porém, quando foi analisada a variabilidade pelos desvios-padrão, constatou-se que nenhum modelo conseguiu representar

com eficiência a variabilidade da ETo observada. Os resultados apresentados pelos modelos, apesar da baixa representatividade, os desvios mantiveram-se próximos, todavia subestimando a variabilidade da ETo observada.

Assim sendo, diante dessas análises, foi possível constatar a viabilidade da adoção do método de Hargreaves-Samani como padrão de estimativa da ETo no cenário de mudanças climáticas, para a região da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe.

A seguir, serão mostradas as análises do impacto das mudanças climáticas na ETo e nas precipitações, variáveis básicas para a modelagem hidrológica, e, como resultado final, a simulação das vazões, com auxílio do modelo de simulação hidrológica SMAP, com o objetivo principal de verificar o impacto nas vazões da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe.

5.5 Identificação das mudanças de clima em termos de Evapotranspiração Potencial e Precipitação na Bacia de Contribuição do Reservatório Orós

Este item tratará da identificação das mudanças climáticas em termos de Evapotranspiração Potencial (ETo) e Precipitação – variáveis básicas para a modelagem hidrológica – ao nível de bacia hidrográfica, procedendo ao relato do estudo de caso proposto nesta pesquisa, a saber: a bacia de Contribuição do Reservatório Orós.

5.5.1 Evapotranspiração Potencial ETo no cenário RCP4.5

Adiante, serão mostradas as análises comparativas entre a ETo média estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 obtido em função de Hargreaves-Samani (P(H)) para todos os modelos do CMIP5 nos cenários de mudanças climáticas RCP4.5 e RCP8.5, e para os períodos futuros 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100, com a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 com dados observados P_(OBS), nas figuras apresentada como (ETo_OBS), no período histórico 1976-2005.

Devido ao grande número de figuras, serão apresentadas apenas aquelas referentes ao período 2041 a 2070, nos dois cenários RCP4.5 e RCP8.5. As demais figuras serão apresentadas no Apêndice B do trabalho. As figuras correspondentes às precipitações (Pr) e vazões (Q) serão apresentadas de maneira semelhante.

5.5.1.1 Período de 2011-2040

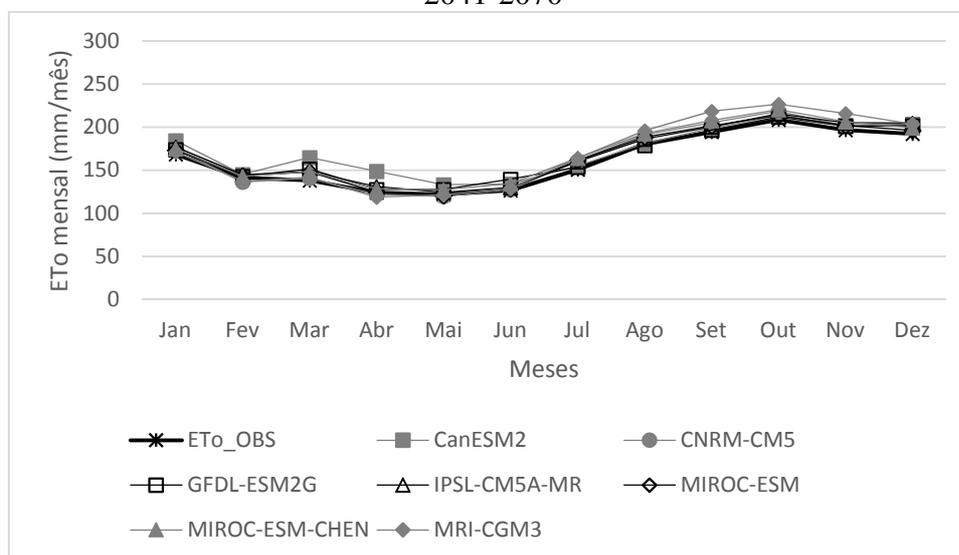
Na região da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, os modelos projetaram aumento da ETo, porém não significativo, uma vez que os meses de maior aumento foram Março, com 12,1%, e Abril, 10,8%, apontado pelo modelo CanESM2. O aumento apontado pelos demais modelos, em média, não ultrapassou 7% (ver Figura 98, Apêndice B).

Em relação ao desvio-padrão, os modelos não conseguiram representar a variabilidade da ETo do clima presente (Desvp ETo_OBS), mantendo-se, em sua maioria, com valores muito abaixo desta. Apenas dois modelos registraram um desvio-padrão acima do dado observado, o CNRM-CM5 para Abril e Maio (pouco acima de 22 mm/mês, contra 17,8 mm/mês e 17,1 mm/mês do observado), e o CanESM2, com 26,8 mm/mês, contra 14,5 mm/mês do observado (Figura 99, Apêndice B).

5.5.1.2 Período de 2041-2070

Para o período de 2041-2070, no 1º semestre, apenas o modelo CanESM2 projetou um aumento no período compreendido entre Janeiro e Maio, cerca de 9%, 2%, 19%, 20% e 9%, sendo os maiores percentuais em Março e Abril. Já no 2º semestre, o MRI-CGM3 projetou os maiores aumentos, variando de 5,9 a 12,4%, tendo os maiores percentuais sido apresentados pelos meses de Setembro (12,4%) e Novembro (10%). Os demais modelos apontaram uma leve projeção de aumento, variando entre 5% e 9% (Figura 56)

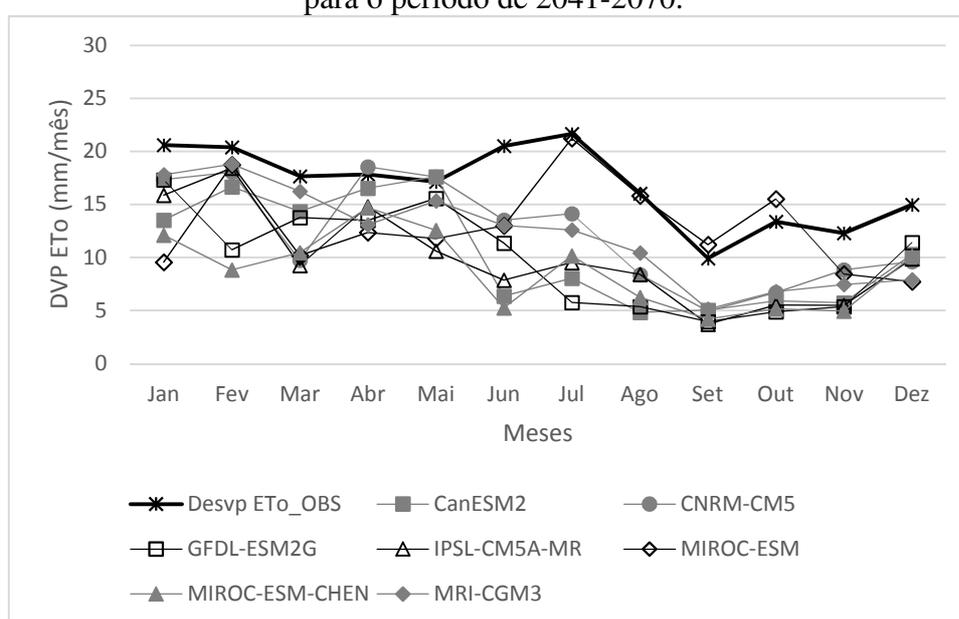
Figura 56 – ETo mensal estimada pelo método de P(H) no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com relação à variabilidade apontada pelo desvio-padrão, os modelos mantiveram os desvios-padrão da ETo modelada bem abaixo do desvio-padrão da ETo de clima presente (Desvp ETo_OBS), principalmente nos meses do 2º semestre. A única exceção se deu para o modelo MRICO-ESM, para Setembro e Outubro, onde o mesmo registrou um desvio-padrão de 11,2 mm/mês e 15,5 mm/mês, cerca de 13,1% e 15,7% maior que o (Desvp ETo_OBS) (Figura 57).

Figura 57 – Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P(H) no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.5.1.3 Período de 2071-2100

No período 2071-2100, apenas os dois modelos projetaram elevação da ETo, semelhante aos resultados do período anterior (2041-2070): CanESM2 no 1º semestre, e MRI-CGM3 para o 2º semestre. Analisando o mês de Março, CanESM2 projetou o maior aumento, em torno de 15% maior que o período anterior, enquanto o MRI-CGM3 projetou aumento de 4 a 6,5% maior que o período anterior. Verificou-se, assim, que, a elevação da concentração de CO₂ pouco se refletiu para a elevação e/ou diminuição da ETo nesse período final do século XXI (Figura 100, Apêndice B).

A mesma analogia em relação à variabilidade pode ser feita para esse período, pois apenas o modelo MIROC-ESM apresentou um leve aumento no desvio-padrão para o mês de Julho, quando comparado ao (Desvp ETo_OBS), e pouco maior que no período anterior (2041-

2070). Os demais modelos mantiveram seus desvios-padrão com forte subestimativa em relação ao (Desvp ETo_OBS), principalmente no 2º semestre (Figura 101, Apêndice B).

5.5.2 Evapotranspiração no Cenário RCP8.5

5.5.2.1 Período de 2011-2040

Nesse cenário, a influência do aumento na concentração de CO₂ pouco influenciou nas projeções de aumento da ETo. Para tanto, quando foram comparados o período anterior no cenário RCP4.5 (nível intermediário de concentrações de CO₂) com o referido período (2011-2040), verificou-se que praticamente não houve alteração na ETo em relação ao cenário anterior.

O maior aumento, porém relativamente pequeno, foi previsto pelo modelo CanESM2 para Março, com aproximadamente 19%, seguido pelo GFDL-ESM2G, com 15,3%. Os demais modelos apresentaram resultados muito próximos à ETo_OBS e/ou aumento não ultrapassando, em média, os 9% (ver Figura 102, Apêndice B)

A baixa variabilidade apresentada pelos desvios-padrão mostra o quanto os modelos têm dificuldade em simular as condições da variabilidade natural do clima presente, apresentando, assim, grande subestimativa, principalmente para o 2º semestre. Assim sendo, os desvios-padrão projetados pelos modelos mantiveram-se, em sua maioria, muito abaixo dos valores do (Desvp ETo_OBS). Apenas em Abril e Dezembro alguns modelos registraram desvio-padrão um pouco acima do (Desvp ETo_OBS). Para os demais meses do ano, os modelos projetaram desvios-padrão pequenos, principalmente no que diz respeito ao 2º semestre (Figura 103, Apêndice B).

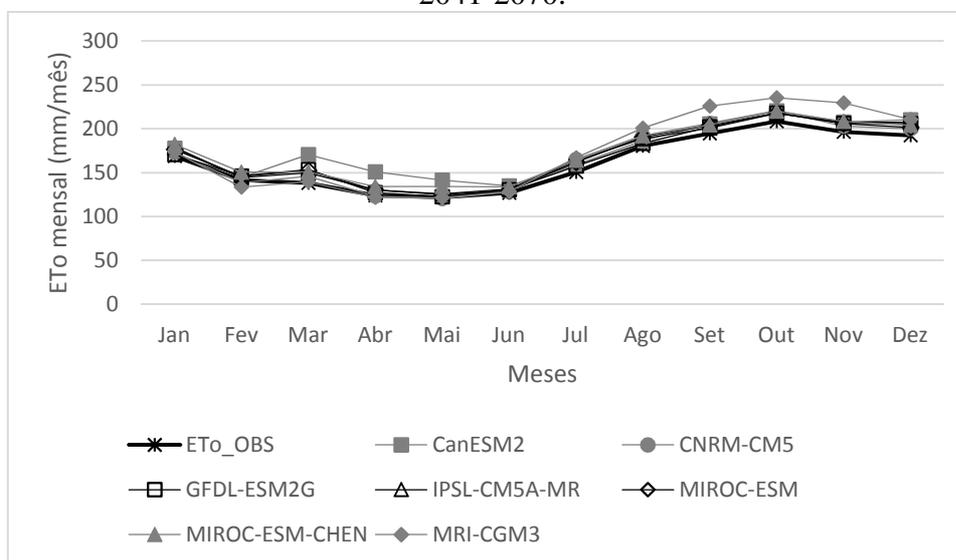
5.5.2.2 Período de 2041-2070

Na análise do período 2041-2070, no cenário de maior concentração de CO₂ (RCP8.5), a ETo projetada pelos modelos nesse cenário manteve-se praticamente com as mesmas características do cenário anterior (RCP4.5), para o mesmo período. Os modelos CanESM2 (1º semestre) e MRI-CGM3 (2º semestre) também apresentaram praticamente as mesmas projeções de aumento discreto.

O CanESM2, para o mês de Março, apontou um aumento de pouco mais de 4%, enquanto o MRI-CGM3 projetou, para Setembro, aumento semelhante, quando comparado ao mesmo período do cenário anterior. Os demais modelos também se mantiveram praticamente

com as mesmas projeções de aumento (Figura 58).

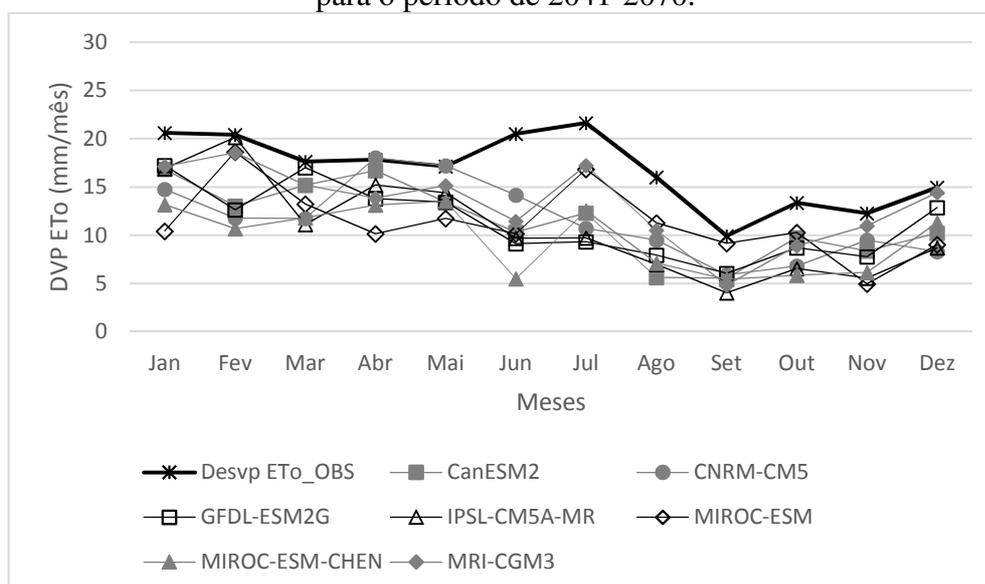
Figura 58 – ETo mensal estimada pelo método de P(H) no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Já os desvios-padrão mostraram nesse período unanimidade dos modelos. A maioria deles projetou ETo abaixo do (Desvp ETo_OBS), à exceção dos modelos CNRM-CM5, para Abril e Maio, MIROC-ESM, para Fevereiro, e GFDL_ESM2G, para Março, e MRI-CGM3, para Dezembro, quando apresentaram um bom desempenho em relação ao (Desvp ETo_OBS) (Figura 59).

Figura 59 – Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P(H) no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.5.2.3 Período de 2071-2100

Quando foi analisado o período 2071-2100 no cenário de concentração máxima de CO₂ (RCP8.5), foi possível perceber que apenas os modelos CanESM2 e MRI-CGM3 projetaram um aumento mais expressivo quando comparado aos demais. Todavia, esse aumento tornou-se mais contundente quando comparado ao mesmo período no cenário anterior (RCP4.5).

Para o modelo CanESM2, como mostrado na Figura 104 do Apêndice B, o mês de Março sofreu um acréscimo de 9%, Abril, de 24,9%, e Maio, de 13,5%. O MRI-CGM3 projetou um acréscimo de 9,4% em Setembro, 13% em Outubro e 10,9% para Novembro, quando comparados ao cenário anterior. Os demais modelos praticamente não sofreram alteração significativa de aumento em relação ao cenário anterior (Figura 104, Apêndice B).

Quando a variabilidade foi analisada, percebeu-se que os modelos apresentaram um desvio-padrão pequeno, se comparado ao (Desvp ETo_OBS). O modelo GFDL-ESM2G foi o único que apresentou bom desempenho ao acompanhar a variabilidade da ETo observada, para os meses de Março, Abril e Maio. Os demais, em sua grande maioria, apresentaram forte variabilidade com grande subestimativa do (Desvp ETo_OBS). Apenas para alguns meses, a exemplo de Abril e Maio, o IPSL-CM5A-MR apresentou um desvio-padrão mais elevado (Figura 105, Apêndice B).

5.5.3 Precipitação no Cenário RCP4.5

5.5.3.1 Período de 2011-2040

Analisando a precipitação projetada pelos modelos, foi possível perceber que o modelo MRI-CGM3 apontou maior aumento da precipitação em relação à precipitação observada (Pr_OBS), para os meses de Fevereiro (aumento de 66,7%) e Março (19,4%).

Para os meses mais chuvosos (Março e Abril) e para a quadra chuvosa (Fevereiro a Maio), os modelos CNRM-CM5 e IPSL-CM5A-MR projetaram aumento, porém não muito significativo, uma vez que, tomando como referência os meses mais chuvosos (Março e Abril), esses modelos apontaram aumento de 2% e 3,3% (CNRM-CM5), e de 9,9% e 7,4% (IPSL_CM5A-MR) respectivamente.

Os modelos MIROC-ESM, CanESM2 e MIROC-ESM-CHEN projetaram redução da precipitação, com uma redução, para os meses mais chuvosos (Março e Abril), de

aproximadamente 2% a 8%, 10% a 21% e 36% a 53%, respectivamente.

O MIROC-ESM-CHEN projetou a maior redução para o 1º semestre, com aproximadamente 62% para Janeiro, 48% para Fevereiro, 36% para Março, 53% para Abril, 71% para Maio e 27% para Junho. No 2º semestre, o modelo MIROC-ESM-CHEN projetou um aumento das precipitações para Setembro (205%) e Outubro (352%). Logo em seguida projetou redução de quase 90% para Novembro, e de cerca de 82% para Dezembro. O CanESM2, para Dezembro, projetou um aumento de 68,9% em relação a (Pr_OBS) (ver Figura 106, Apêndice B).

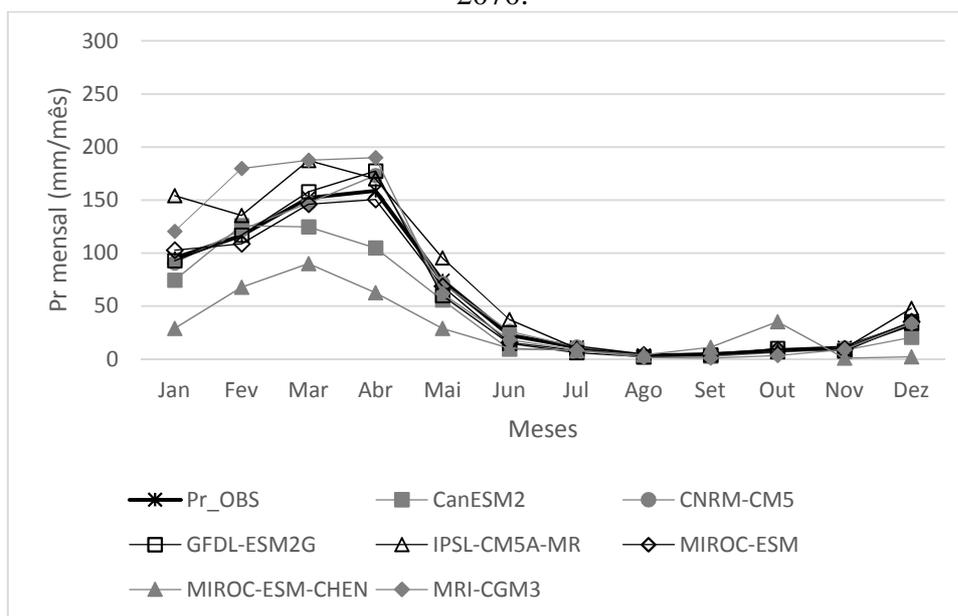
A maioria dos modelos apresentou desvio-padrão próximo ao desvio-padrão da precipitação observada no clima presente (Desvp Pr-OBS), mostrando, assim, bom desempenho. Apenas alguns modelos, como MIROC-ESM-CHEN, o IPSL-CM5A-MR, o GFDL-ESM2G e o MRI_CGM3, apresentaram superestimativa nos desvios-padrão para alguns meses específicos do 1º semestre e Dezembro, como foi apontado pelo modelo CanESM2, mostrando maior variabilidade em torno da média, e pelos modelos IPSL-CM5A-MR, para Abril, e CanESM2, para Dezembro (Figura 107, Apêndice B).

5.5.3.2 Período de 2041-2070

No período 2041-2070, apenas os modelos MRI-CGM3 e IPSL-CM5A-MR projetaram um aumento mais expressivo, apontado para Janeiro e Abril. Para os demais modelos, as projeções se mantiveram em torno de (Pr_OBS) e/ou apresentaram redução para o 1º semestre, principalmente o MIROC_ESEM-CEHN, que registrou, para o 1º semestre, redução média de 55%, enquanto na quadra chuvosa esse percentual de redução foi de 51%. O modelo CanESM2 projetou redução para Março, Abril e Maio, numa média de 26%.

No 2º semestre, o MIROC-ESM-CHEN, assim como no período anterior (2011-2040), projetou aumento da precipitação para Setembro (166,7%) e Outubro (308,1%), maiores que as precipitações observadas (Pr-OBS). No início da pré-estação (mês de Dezembro), cinco modelos projetaram aumento, porém só o IPSL-CM5A-MR registrou elevação de cerca de 46% em relação a (Pr_OBS), com os modelos CanESM2 e MIROC-ESM-CHEN indicando redução (36% e 93,3%, respectivamente), e os demais indicando aumento de, no máximo, 8% (Figura 60).

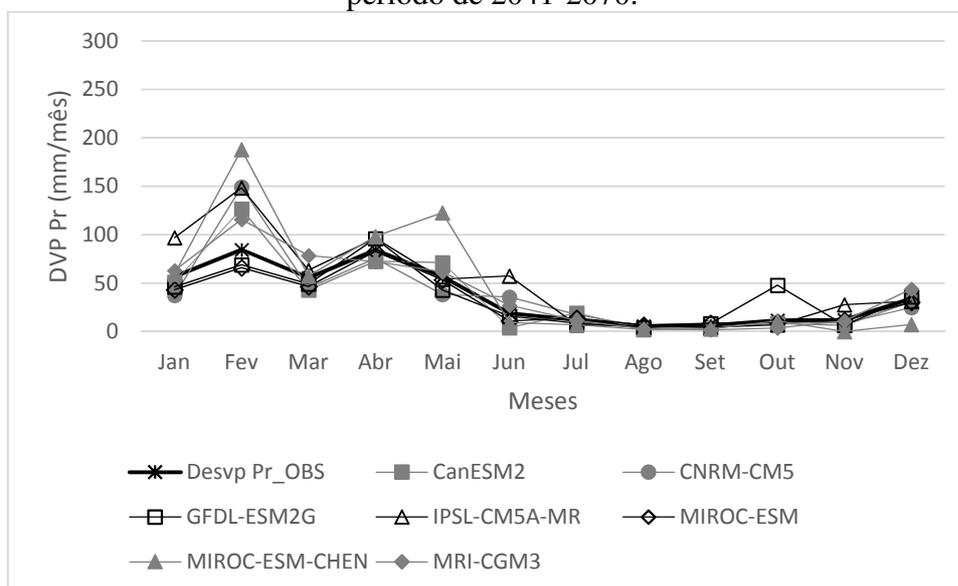
Figura 60 – Precipitação (Pr) mensal projetada no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em relação ao desvio-padrão, cinco dos sete modelos apresentaram um desvio-padrão bem elevado para o mês de Fevereiro, em comparação com o desvio-padrão do clima presente (Desvp Pr_OBS). No período de Março a Junho e no 2º semestre, como exceção dos modelos MIROC-ESM-CHEN em Maio e do IPSL-CM5A-MR em Junho, a maioria dos modelos mostrou comportamento aceitável em relação ao (Desvp Pr_OBS), uma vez que mantiveram grande proximidade, acompanhando a curva dos (Desvp Pr_OBS).

Figura 61 – Desvio padrão mensal da precipitação (Pr) projetada no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No 2º semestre, o modelo GFDL_ESM2G projetou superestimativa do (Desvp Pr_OBS) em Outubro, e o MIROC-ESM-CHEN projetou elevada subestimativa para os meses de Novembro e Dezembro (Figura 61).

5.5.3.3 *Período de 2071-2100*

No período 2071-2100, no 1º semestre, apenas os modelos MRI-CGM3 e IPSL-CM5A-MR projetaram aumento significativo em relação a (Pr_OBS), embora um pouco maior do que no período anterior (2011-2040), em média, de 34,7% de Janeiro a Março, apontado pelo MRI-CGM3, e de 26,2%, pelo IPSL-CM5A-MR.

Os modelos CNRM-CM5, MIROC-ESM e GFDL_ESM-2G praticamente não projetaram aumento, mantendo-se bem próximos a (Pr_OBS). O CanESM2 e o MIROC-ESM-CHEN continuaram projetando redução significativa, mas ainda maior que no período 2041-2070.

No início da pré-estação chuvosa, as maiores projeções de aumento ficaram a cargo do IPSL-CM5A-MR, com uma elevação da precipitação de 37,2%, seguido do MRI-CGM3 com 14,6%. Os demais variaram suas projeções em torno da média da (Pr_OBS), exceto o MIROC-ESM_CHEN que, mais uma vez, manteve a maior projeção de redução (Figura 108, Apêndice B).

Analisando a variabilidade da precipitação projetada pelos modelos em relação à precipitação observada (Desvp Pr_OBS), notou-se que a maioria dos modelos conseguiu acompanhar a curva da variabilidade das precipitações observadas, todavia indicando elevada superestimativa, principalmente nos meses de Fevereiro a Maio.

O modelo IPS-CM5A-MR projetou forte variabilidade nos meses de Abril a Junho, assim como o GFDL-ESM2G em Dezembro. Desta forma, para o restante dos meses, principalmente de Junho a Outubro, praticamente todos os modelos conseguiram acompanhar a variabilidade da precipitação observada (Figura 109, Apêndice B).

5.5.4 *Precipitação no Cenário RCP8.5*

5.5.4.1 *Período de 2011-2040*

No período 2011-2040, no cenário de concentração máxima de CO₂ (RCP8.5), dois modelos projetaram aumento significativo em relação a (Pr_OBS), o IPSL-CM5A-MR para

Janeiro, com aproximadamente 43%, e o MRI-CGM3, para Janeiro, Fevereiro e Abril, com 21,3%, 24,9% e 16,6%, respectivamente. Os demais não apresentaram resultados significativos, uma vez que projetaram elevação e/ou diminuição com valores variando bem próximos a (Pr_OBS).

A única exceção mais expressiva de redução no 1º semestre se deu com o modelo MIROC-ESM-CHEN, em torno de 43,8%, para os meses de Janeiro a Junho, sendo, para o período chuvoso (Fevereiro a Maio), por volta de 43%. Para Setembro e Outubro, continuou projetando aumento na ordem de 169% e 310,5%, sendo que estes meses, pela climatologia, registram um acumulado médio de 4,2mm e 8,6 mm, respectivamente. Assim, esse modelo expressou uma projeção de aumento muito além das condições climatológicas normais, diferindo bastante dos demais (Figura 110, Apêndice B).

Nesse período, os modelos mantiveram um bom desempenho em relação à variabilidade da precipitação observada no clima presente (Desvp Pr_OBS). As únicas exceções de aumento na representação da variabilidade se deram com os modelos MIROC-ESM-CHEN em Março, IPSL-CM5A-MR em Abril, GFDL-ESM2G em Novembro (apesar de não apresentar projeção de aumento da precipitação, conforme mostra a Figura 110, no Apêndice B), e CanESM2 em Dezembro.

Em Novembro e Dezembro, o MIROC-ESM-CHN registrou variabilidade menor do que aquela observada no clima presente, fazendo jus às projeções de redução da precipitação (Figura 111, Apêndice B).

5.5.4.2 *Período de 2041-2070*

De 2041-2070 apenas, os modelos MRI-CGM3 e IPSL-CM5A-MR projetaram aumento expressivo das precipitações em relação à precipitação de clima presente (Pr_OBS).

O MRI-CGM3 projetou seu aumento de Janeiro a Abril, com picos em Janeiro (46,6%), Fevereiro (141,1%), Março (36,8%) e Abril (8,3%). O IPSL-CM5A-MR, que estendeu seu aumento para todo o 1º semestre, variando do menor percentual em Abril (5,6%) até o maior percentual em Junho (pouco mais de 97,8%), passando por Janeiro (46,3%), Fevereiro (26,3%), Março (13,7%) e Maio (47,6%).

Em Janeiro, os modelos CanESM2, GFDL-ESM2G e MIROC-ESM projetaram aumentos de 16,6%, 11,3% e 15,9%, respectivamente. Alguns modelos, no 1º semestre, projetaram precipitações em torno da observada (Pr_OBS) e/ou com redução da mesma. Em Fevereiro, apenas CanESM2 e MIROC-ESM registraram aumento entre 3% e 4,2%. Em Abril,

o CNRM-CM5 e o MRI-CGM3 projetaram aumento, variando entre 8% e 15%, isto é: percentuais de projeção de aumento de pouca significância, uma vez que compreende o período chuvoso.

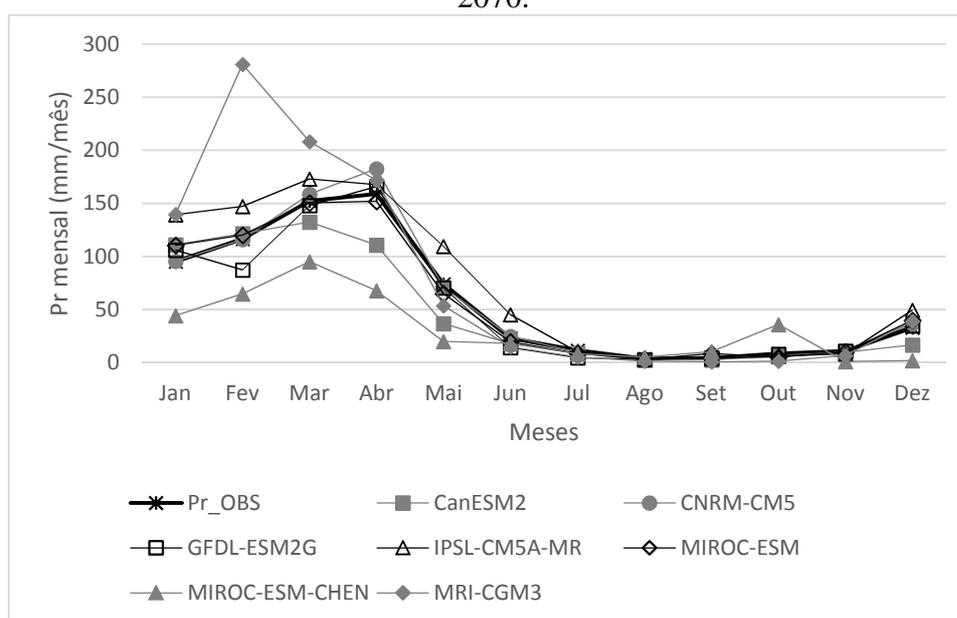
Agora, verificando a redução projetada pelo modelo CanESM2, para Março (12,9%), Abril (30,2%) e Maio (50,5%), a maior redução em todo o 1º semestre foi registrada pelo MIROC-ESM-CHEN, de aproximadamente 48%, enquanto que, no período chuvoso, com cerca de 53% de redução em comparação a (Pr_OBS).

Para o mês de início da pré-estação chuvosa, os modelos CanESM2 e MIROC-ESM-CHEN apontaram redução das precipitações. Os demais modelos projetaram aumento variando entre 5% e 50%. O IPSL-CM5A-MR indicou 50%, seguido do MRI-CGM3 e MIROC-ESM, por volta de 20%, e os demais, em torno de 5% (Figura 62).

Nesse período, seis dos sete modelos projetaram, para o mês de Fevereiro, uma variabilidade muito maior do que aquela encontrada no clima presente, mostrando que a variabilidade natural da precipitação no início da quadra chuvosa pode ser alterada em função de mudanças climáticas.

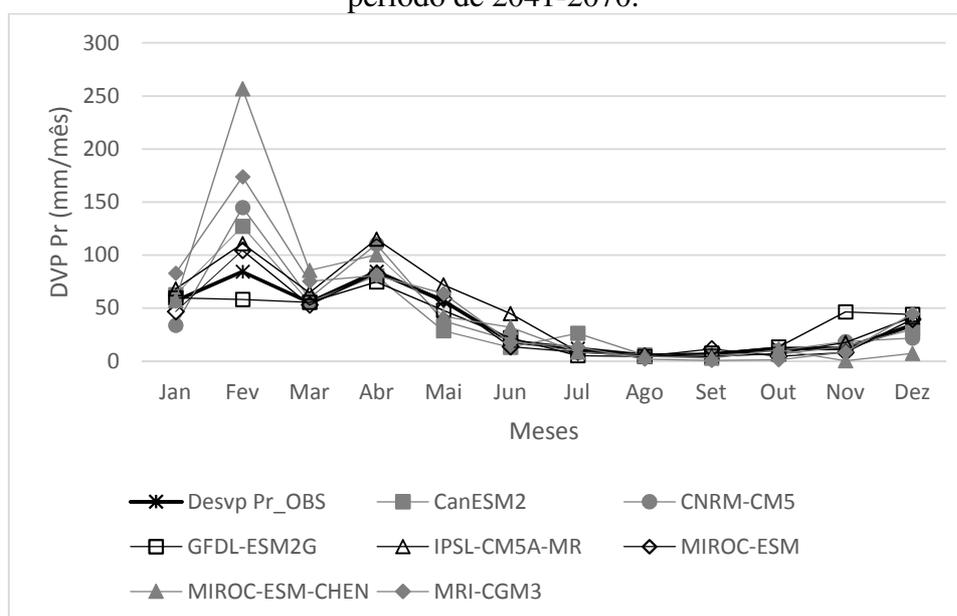
O mesmo pôde ser percebido para o modelo GFDL-ESM2G em Fevereiro, Abril, Maio, Junho, e em Novembro, porém com menor expressão. No 2º semestre, praticamente todos os modelos projetaram variabilidade semelhante à encontrada no clima presente (Desvp Pr_OBS) (Figura 63).

Figura 62 – Precipitação (Pr) mensal projetada no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 63 – Desvio padrão mensal da precipitação (Pr) projetada no cenário RCP8.5, para o período de 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.5.4.3 Período de 2071-2100

Para o período 2071-2100, poucos modelos projetaram aumento significativo para precipitação no 1º semestre, são eles: o MRI-CGM3 para Janeiro (87,8%), Fevereiro (105,3%), Março (90,5%) e Abril (12,8%); o IPSL-CM5A-MR para Janeiro (66,3%), Fevereiro (19,8%) e Março (11,6%); o MIROC-ESM para Janeiro (19,5%) e para os demais meses, um pouco menos que a (PR_OBS); e o CNRM-CM5 para Janeiro (3,6%), Fevereiro (0,6%), Março (14,7%), Abril (21,8%) e Maio com (8,4%).

Os modelos CanESM2 e MIROC-ESM-CHEN projetaram a maior redução, CanESM2 em Janeiro com 12,4%, Março com 31,3%, Abril com 60,3%, Maio com 73,3% e Junho com 67,1%, e o MIROC-ESM-CHEN, com reduções ainda maiores. Assim sendo, dos sete modelos analisados, a maioria projetou para o 1º semestre redução e/ou proximidade à (Pr_OBS), ou seja, com pouca significância.

Em Dezembro, início da pré-estação chuvosa, a maior expressão de aumento se deu pelo modelo IPSL-CM5A-MR, girando próximo de 88%, seguido do MIROC-ESM (27%), CNRM-CM5 (13,1%), e GFDL-ESM2G (4%). Já os modelos MRI-CGM3, CanESM2 e MIROC-ESM-CHEN registraram redução da precipitação, de 6,1%, 60,1% e 95,7%, respectivamente (Figura 112, Apêndice B).

Apesar da maioria dos modelos não projetarem aumento significativo da

precipitação, mostraram grande variabilidade em relação ao (Desvp Pr_OBS). Logo, nenhum modelo conseguiu representar a variabilidade climatológica da precipitação observada no 1º semestre. Neste período, apenas o modelo MIROC-ESM apresentou um desempenho razoável de Janeiro a Abril, embora subestimando em relação ao (Desvp Pr_OBS).

No 2º semestre, de Julho a Outubro, todos os modelos apresentaram um bom desempenho. Em Novembro, houve uma projeção de elevação da variabilidade, detectada pelos modelos CNRM-CM5 e IPSL-CM5A-MR, enquanto que em Dezembro, quatro dos sete modelos projetaram elevação da variabilidade, principalmente o IPSL-CM5A-MR e o MRI-CGM3 (Figura 113, Apêndice B).

5.6 Avaliação dos impactos das mudanças de clima em termos das vazões afluentes ao reservatório Orós e do Potencial de Alocação (Q90)

5.6.1 Vazão no Cenário RCP4.5

5.6.1.1 Período de 2011-2040

Para o período 2011-2040, a maioria dos modelos projetou redução das vazões de Janeiro a Junho, exceto os modelos MRI-CGM3 em Fevereiro, Março e Abril, tendo maior expressão de aumento para os meses de Fevereiro (91,2%) e Março (59,5%), e o IPSL-CM5A-MR indicando aumento em Abril (por volta dos 15%), quando seus resultados foram comparados às vazões simuladas no clima presente (1976-2005).

O modelo MIROC-ESM-CHEN indicou maior redução para o período de Janeiro a Junho, variando entre 78 e 90%. Os demais modelos projetaram reduções variando de 15 a 37%, para o mês de maior vazão (Abril), e nos demais meses do 1º semestre, as projeções das vazões para o período de 2011-2040 oscilaram entre modelos, sendo o máximo de redução de 61,2% em Maio, apontado pelo CanESM2. Nos meses do 2º semestre, os modelos mantiveram bom desempenho, mantendo-se dentro dos padrões observados (Figura 114, Apêndice B).

Em relação à variabilidade em torno da média, os modelos mostraram dificuldade em representar a variabilidade das vazões simuladas ou observadas no clima presente. O MRI-CGM3 demonstrou variabilidade acima da simulada em Fevereiro e Março, e em Maio, com desvios padrão acima dos 100 m³/s, enquanto o IPSL-CM5A-MR, em Abril, com desvio-padrão acima dos 191m³/s, contra os 155,1m³/s das vazões observadas no clima presente.

Os demais modelos apresentaram desvio-padrão menor quando comparados às

vazões simuladas, principalmente no mês de maior vazão (Figura 115, Apêndice B). As vazões simuladas, assim como as modeladas, apresentaram assimetria positiva em todos os meses do ano, porém variando entre moderada ($0,15 \leq |AS| < 1$) e forte ($|AS| > 1$).

Uma vez que um maior número de modelos projetou forte assimetria, ou seja, indicando uma maior concentração nos valores mais baixos. Nesse caso, como a distribuição apresentou forte assimetria positiva, sabe-se que, apesar da alta concentração de dados em valores mais baixos, a média sofrerá influência da cauda à direita, deslocando-se em sua direção. Nesse caso, haverá mais observações abaixo da média do que acima dela (Figura 116, Apêndice B).

5.6.1.2 Período de 2041-2070

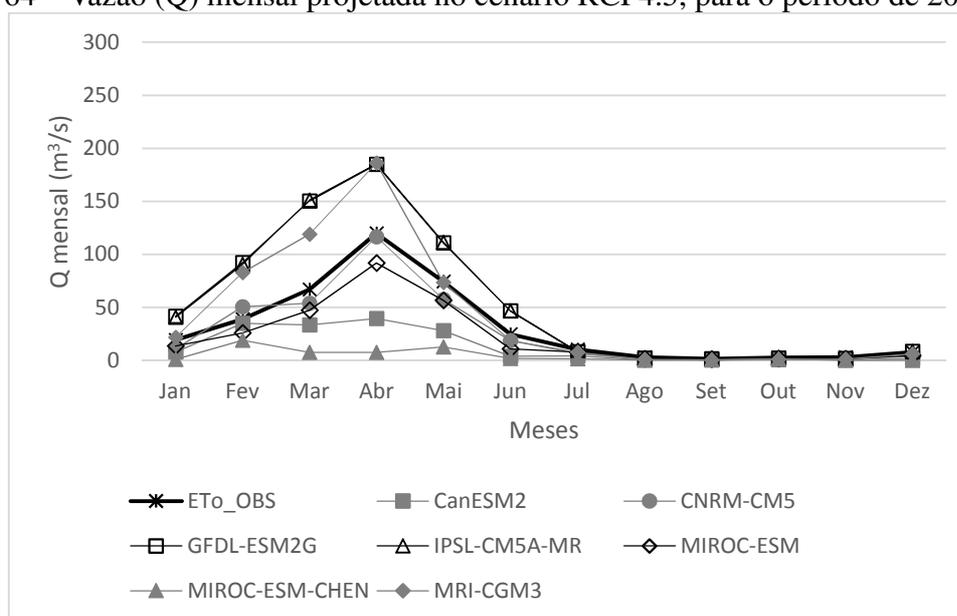
No período 2041-2070, apenas os modelos MRI-CGM3, IPSL-CM5A-MR e GFDL-ESM2G projetaram aumento das vazões no 1º semestre, sendo o IPSL-CM5A-MR e o GFDL-ESM2G para o período de Janeiro a Junho, e o MRI-CGM3 de Fevereiro a Abril, todos com aumento mais expressivo do que no período anterior (2011-2040).

Esse aumento pode ser quantificado de maneira diferente entre os modelos. O MRI-CGM3 projetou aumento de Fevereiro a Abril de 113,6%, 78%, 55%, respectivamente. Os modelos IPSL-CM5A-MR e GFDL-ESM2G projetaram vazões elevadas entre Janeiro e Junho, com praticamente os mesmos percentuais de aumento, 112%, 133,8%, 126%, 54,5% e 88,7%, respectivamente.

Os demais modelos apontaram projeções de reduções nas vazões, principalmente o MIROC-ESM-CHEN, que registrou vazões extremamente baixas, variando de 1,1 a 19 m³/s, de Janeiro a Junho. Modelos como o CNRM-CM5 e o MIROC-ESM projetaram redução, variando entre 2,8% e 30%, para o período de Março a Maio.

O CanESM2 também apontou projeção expressiva de redução, quando comparada às vazões observadas (Q_Simulada) no clima presente. Como exemplo, no mês de maior vazão (Abril), registrou apenas pouco mais de 39 m³/s, bem menor que a vazão simulada de Abril (119,9 m³/s), ou seja: com uma redução de aproximadamente 67% (Figura 64).

Figura 64 – Vazão (Q) mensal projetada no cenário RCP4.5, para o período de 2041-2070.

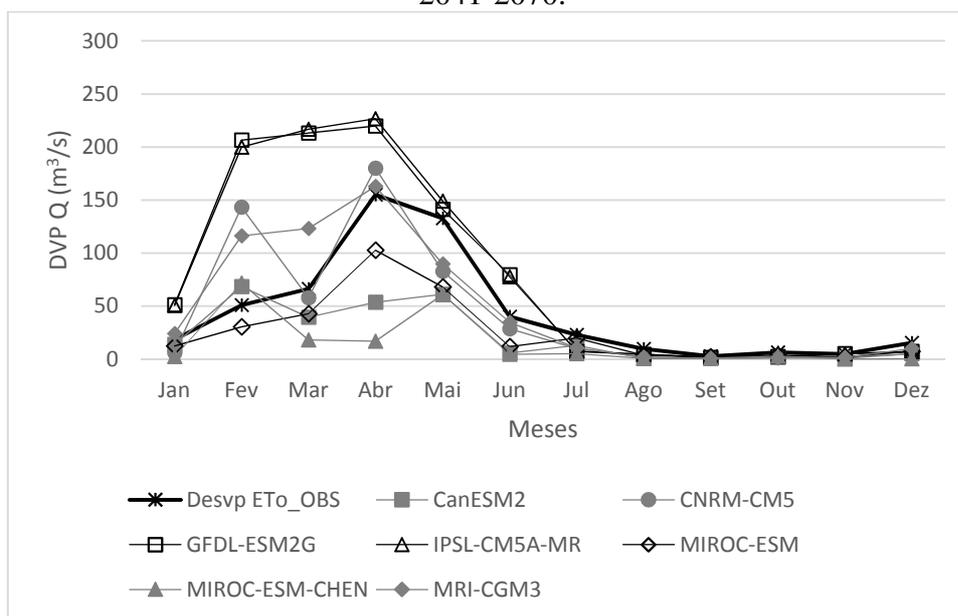


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quando analisado o desvio-padrão, foi possível perceber, mais uma vez, a dificuldade de se representar a variabilidade das vazões observadas. Alguns modelos, como o GFDL-ESM2G e o IPSL-CM5A-MR, projetaram variabilidade bastante elevada, principalmente para os meses de Fevereiro a Abril, indicando que as alterações climáticas impactarão substancialmente as vazões nesse período.

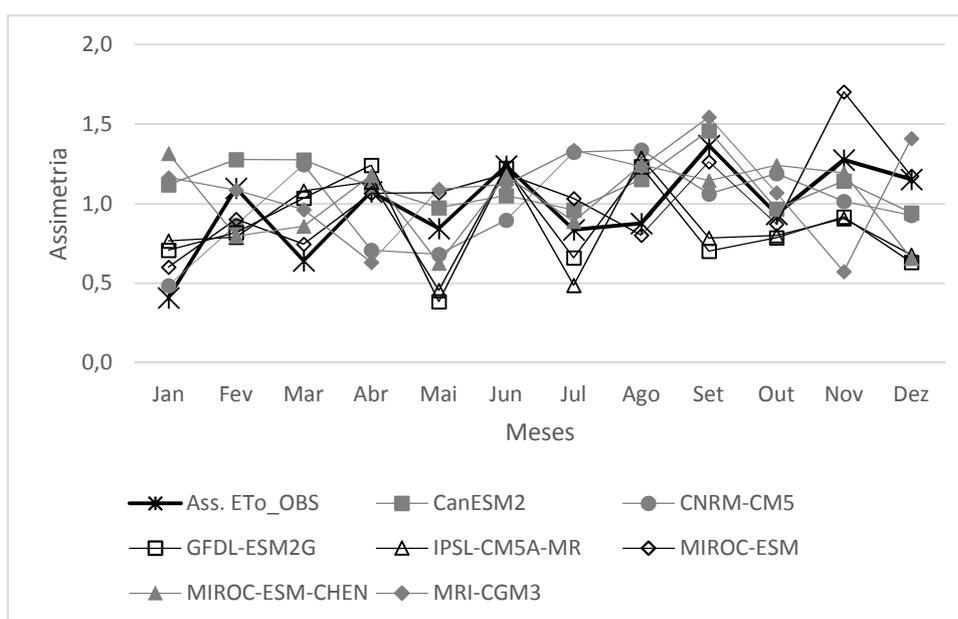
Para o 1º semestre, nenhum modelo conseguiu acompanhar a variabilidade do clima presente, mas somente para o 2º semestre. Modelos como o CNRM-CM5 (em Fevereiro e Abril) e o MRI-CGM3 (em Fevereiro, Março e Abril) também projetaram superestimativa nos desvios-padrão em relação às suas médias, quando comparadas aos desvios-padrão das vazões observadas. Pode-se, então, deduzir que estes últimos dois modelos mencionados produziram respostas significativas de alerta, ou resultados que merecem atenção, em relação à influência das mudanças climáticas nas vazões da região em estudo, uma vez que apresentaram estatísticas muito elevadas, em comparação ao clima presente (Figura 65).

Figura 65 – Desvio padrão mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP4.5, para o período 2041-2070.



Nesse período, o coeficiente de assimetria indica, mais uma vez, que as vazões simuladas, assim como as modeladas, apresentaram assimetria positiva em todos os meses do ano, variando entre moderada e forte, registrando, com isso, maior concentração das vazões em seus menores patamares (Figura 66).

Figura 66 – Assimetria mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP4.5, para o período 2041-2070.



Apontando preliminarmente que, com o passar do tempo, há uma influência da elevação das concentrações de CO₂ para as vazões desse período, pois, não foi apontada, em hipótese alguma, nem em nenhum mês do ano, assimetria negativa, o que significa a elevação das vazões devido à concentração das mesmas acima da média.

Para tanto, nesse período de tempo intermediário, essas informações são de grande relevância para o cenário de gestão dos recursos hídricos. Logo, caso esse cenário de emissões se caracterize concretamente, medidas preventivas devem ser tomadas com antecedência, uma vez que os sinais já são claros a partir de 2011 (Figura 66).

5.6.1.3 Período de 2071-2100

Quando as concentrações de CO₂ chegarem ao seu nível máximo, no período 2071-2100, os mesmos modelos que indicaram projeção de aumento das vazões no 1º semestre, no período anterior (2041-2070), são os mesmos que apontam aumento nas vazões, em relação às vazões de clima presente.

O que chama a atenção está no fato de alguns modelos projetarem redução nas vazões, de Janeiro a Abril, em relação ao período 2041-2070, quais sejam: o MRI-CGM3 para os meses de Fevereiro (42,5%), Março (64%) e Abril (30,2%), o IPSL-CM5A-MR e o GFDL-ESM2G, com aumento mais expressivo para todos os meses do 1º semestre, sendo Janeiro (69,3%), Fevereiro (41,5%), Março (81,9%), Abril (27,1%), Maio (83,6%) e Junho (127%). Os demais modelos indicaram que, se as concentrações de CO₂ se concretizarem, haverá uma redução maior que no período anterior 2041-2070 (Figura 117, Apêndice B).

As vazões projetadas pelos modelos apresentaram desvio-padrão bem menor que as de clima presente, exceto para os modelos MRI-CGM3, para os meses de Fevereiro (72,2%) e Março (39,4%) maior que o observado, e o IPSL-CM5A-MR, para Janeiro (97,3%), Fevereiro (16,1%), Março (63,5%), Maio (56%) e Junho com (141,5%), percentuais bem expressivos, quando comparados à variabilidade das vazões observadas (Desvp Q_Simulada) (Figura 118, Apêndice B).

Pelos valores do coeficiente de assimetria, foi possível perceber que todos os modelos apresentaram assimetria positiva, e em sua maioria, forte assimetria positiva, em especial no 2º semestre (ou seja: $|AS| > 1$), sugerindo que há alta concentração das vazões mais baixas. A cauda mais longa da distribuição fica à direita, indicando a ocorrência de valores altos com baixa frequência. Sendo assim, haverá mais vazões abaixo da média do que acima dela

(Figura 119, Apêndice B).

5.6.2 Vazão no Cenário RCP8.5

5.6.2.1 Período de 2011-2040

Nesse cenário, quando comparado ao RCP4.5 para o mesmo período (2011-2040), percebeu-se que, com o aumento nas concentrações de CO₂, houve um comportamento diferente do modelo MRI-CGM3, que, no cenário anterior (RCP4.5), apontou crescimento das vazões, porém bem menos expressivo: para Fevereiro (32,2%), Março (9,6%) e Abril (10,5%).

Os demais modelos mantiveram suas projeções de redução das vazões no período de Janeiro a Junho, especialmente o MRICO-ESM-CHEN, que, no mês de maior vazão, projetou redução próxima de 80%. Os demais modelos para este mês projetaram redução variando entre 4,9% (MIROC-ESM) e 33% (GFDL-ESM2G). Para o 2º semestre, os modelos apresentaram um bom desempenho em relação às vazões observadas (Figura 120, Apêndice B).

Em relação ao desvio-padrão, para esse período, apenas dois modelos apresentaram leve aumento em relação às vazões observadas no clima presente (Desvp Q_Simulada). O MRI-CGM3, para Fevereiro (21,2%) e Março (4,2%), e o IPSL-CM5A-MR, um pouco maior, para Janeiro (8,1%), Fevereiro (37%), Março (17%) e Abril (11%), quando comparado ao Desvp Q_Simulada. Todos os demais modelos apresentaram desvio-padrão subestimando o Desvp Q_Simulada, isto é: suas vazões projetadas apresentam baixa variabilidade em torno de sua média (Figura 121, Apêndice B).

As vazões projetadas mantiveram o comportamento de todos os períodos já analisados anteriormente, ainda apresentando assimetria positiva, variando de moderada a forte. Com isso, as vazões projetadas se mantiveram com valores baixos e abaixo da média, devido ao alongamento da cauda à direita da distribuição das vazões, indicando a ocorrência das vazões mais altas com baixa frequência (Figura 122, Apêndice B).

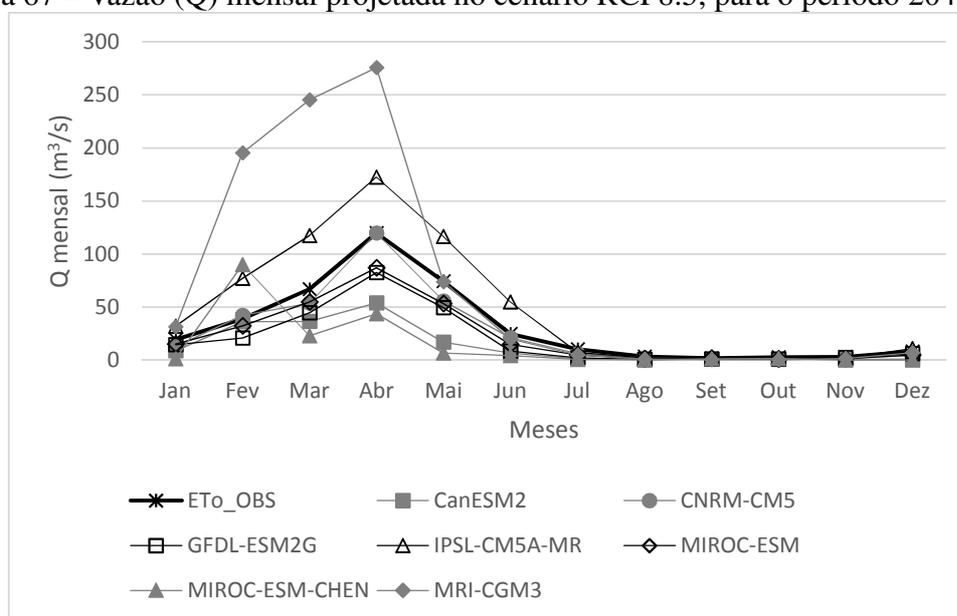
5.6.2.2 Período de 2041-2070

Nesse período, quatro modelos indicaram projeção de aumento das vazões, em relação às vazões observadas no clima presente (Q_Simulada): o MRI-CGM3, que projetou um aumento muito elevado nas vazões, com máximo de 275,8 m³/s para Abril, contra os 119,9 m³/s dos dados observados (aumento de aproximadamente 156 m³/s).

O que chamou a atenção nesse modelo foi o aumento muito expressivo das vazões em Fevereiro, Março e Abril, quando comparadas aos demais modelos e às vazões de clima presente. Outro modelo, o IPSL-CM5A-MR, projetou aumento, de Janeiro a Junho, porém muito abaixo do MRI-CGM3, para os meses de Janeiro a Junho, no entanto, bem superior à Q_{Simulada} , com percentuais de aumento de 66,7% (Janeiro), 98,4% (Fevereiro), 75,3% (Março), 43,9% (Abril), 56,4% (Maio) e 120,6% (Junho), conforme mostra a Figura 67.

O MRI-CGM3 projetou 61,9% para Janeiro, e o MIROC-ESM-CHEN, apontou 131,7% para Fevereiro. Os demais modelos mantiveram as projeções de redução das vazões de Janeiro a Junho, sendo o MIROC-ESM-CHEN o que registrou maior redução (Figura 67).

Figura 67 – Vazão (Q) mensal projetada no cenário RCP8.5, para o período 2041-2070.



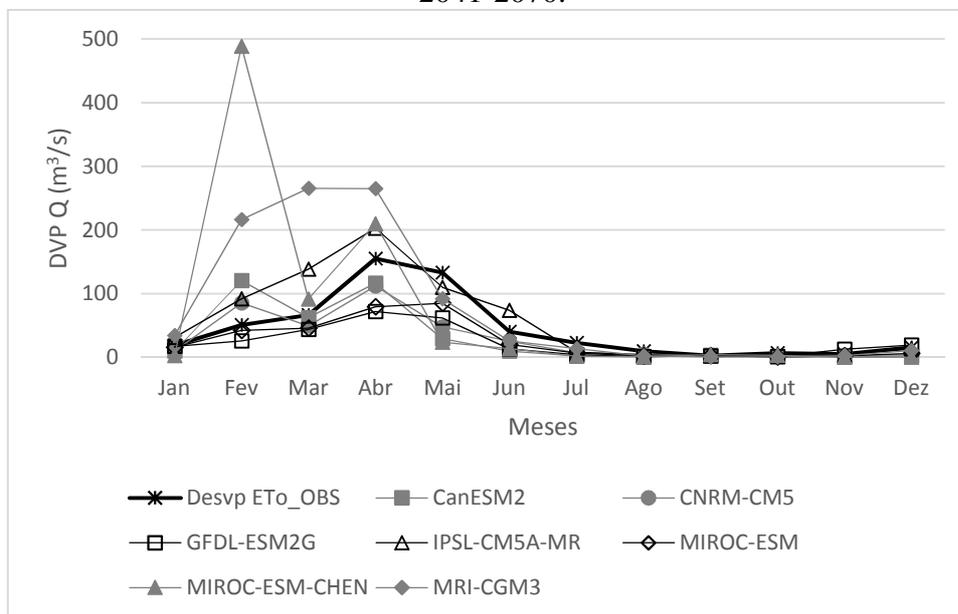
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para esse período, o maior desvio-padrão foi indicado pelo modelo MIROC-ESM-CHEN, com cerca de 489 m^3/s para o mês de Março, cerca de 862% maior que o de clima presente, seguido do MRI-CGM3 para Março e Abril (registrando acima de 264 m^3/s), do IPSL-CM5A-MR para Abril, com 203 m^3/s , e pelo MIROC-ESM-CHEN em Abril, com 209,8 m^3/s , bem acima dos 151,1 m^3/s apresentados pelo desvio-padrão das vazões de clima presente (Desvp Q_{Simulada}).

O CanESM2 mostrou um desvio-padrão de 120,5 m^3/s para o mês de Fevereiro. Para os demais meses do 1º semestre, os desvios mantiveram-se abaixo do Desvp Q_{Simulada} , mostrando baixa variabilidade (Figura 68). As vazões nesse período continuaram apresentando assimetria positiva, sendo que praticamente metade com assimetria moderada e outra metade

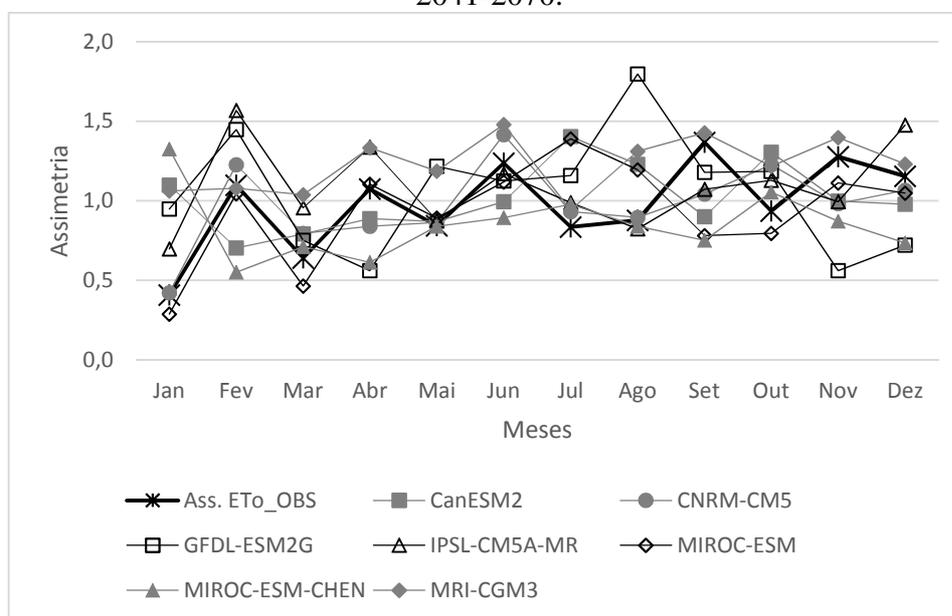
apresentando assimetria elevada ou forte (Figura 69).

Figura 68 – Desvio padrão mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP8.5, para o período 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 69 – Assimetria mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP8.5, para o período 2041-2070.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Mesmo nesse contexto, as vazões projetadas apresentaram maior frequência nos valores mais baixos, por apresentarem assimetria positiva. O grau de assimetria mais elevado manteve-se em praticamente metade das vazões, o que indica que metade delas apresenta elevada concentração nos valores mais baixos, ou seja: há mais vazões abaixo da média, e baixa

frequência nos valores mais altos (Figura 69).

5.6.2.3 Período de 2071-2100

Nesse período, três modelos apresentaram projeção de aumento das vazões em relação à de clima presente Q_{Simulada} no 1º semestre. O primeiro, MRI-CGM3, desde o início da análise, em 2011, vem registrando maior percentual de aumento de Janeiro a Junho, principalmente em Março, onde registrou mais de 383 m³/s contra 69,9 m³/s de Q_{Simulada} (473,3% maior).

O segundo, IPSL-CM5A-MR, também manteve a projeção de aumento desde 2011 (início das análises) para Janeiro a Junho, sendo o pico de vazão em Abril (273,2 m³/s), aproximadamente 128% maior que a Q_{Simulada} , 118,2% em Janeiro, 147,7% em Fevereiro, 69,2% em Março, 62,8 m³/s em Maio e 102,4 m³/s em Junho, em relação a Q_{Simulada} .

O terceiro modelo, CNRM-CM5, aumentos de 27,3% em Fevereiro, 10,2% em Março e 26,1% em Abril, em relação a Q_{Simulada} . Dentre os demais modelos, o MIROC-ESM-CHEN e o CanESM2 registraram o maior percentual de redução para o 1º semestre (médias de 92,5% e 84,1%, respectivamente), tendo os meses de Janeiro, Maio e Junho, praticamente não projetando vazões (Figura 123, Apêndice B).

Com isso, pode-se deduzir que, se o cenário de alterações climáticas e elevação de CO₂ até o final do século se concretizar, as consequências, segundo praticamente cinco dos sete modelos avaliados, as consequências serão catastróficas, no que diz respeito às vazões da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe.

Considerando a gama de dados observados utilizados na análise e da grande incerteza dos modelos climáticos, esse cenário pode ser alterado, porém, trata-se de uma informação relevante no que diz respeito às tomadas de decisão pelos gestores públicos, comitês de Bacia e, de maneira geral, no gerenciamento dos recursos hídricos.

Com relação ao desvio-padrão, três modelos mantiveram variabilidade acima das vazões observadas (Desvp Q_{Simulada}). O modelo IPSL-CM5A-MR indicou um desvio-padrão maior que 1.035,2 m³/s para Abril (567,4% maior que (Desvp Q_{Simulada})), mostrando, com isso, um valor muito extremo para o mês em questão. Nos demais meses, como Janeiro, o aumento foi de 141,6%, para Fevereiro, de 698,2%, e para Março, de 109,9%.

O CNRM-CM5 registrou um desvio em Fevereiro, Março, Abril e Maio de 158,7%, 74,8%, 46%, respectivamente. Já o MRI-CGM3 registrou um desvio-padrão de 256,7% em Janeiro, 193,3% em Fevereiro, 679,1% em Março, 150% em Abril e 56,7% em Maio. Os demais

modelos mantiveram elevada subestimativa das vazões em relação à de clima presente, principalmente no mês de Abril (Figura 124, Apêndice B).

Nesse período, as vazões projetadas pelos modelos apresentaram assimetria positiva, variando entre moderada e forte, sendo maior o número de meses com assimetria forte, e mais uma vez, como dito anteriormente, a maioria das vazões concentraram-se nos valores mais baixos e abaixo da média, e assim, foram encontradas vazões mais elevadas com baixas frequências (Figura 125, Apêndice B).

5.6.3 *Potencial de Alocação (Q₉₀)*

No intuito de identificar o impacto das mudanças climáticas sobre o processo de alocação, fez-se necessário determinar a vazão de garantia de 90% (Q₉₀) para o reservatório Orós, no período de referência e/ou de clima presente (Q_{90_presente}), a saber: 1976-2005, e futuros (Q_{90_Futuro}), quais sejam: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100, nos cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Esta vazão corresponde a uma garantia de permanência de 90% ao longo do tempo. Segundo a Agência nacional de Águas (ANA), a alocação de água é um processo de gestão empregado para disciplinar usos múltiplos, em sistemas hídricos assolados por estiagens intensas, pela emergência ou por forte potencial de conflito pelo uso da água.

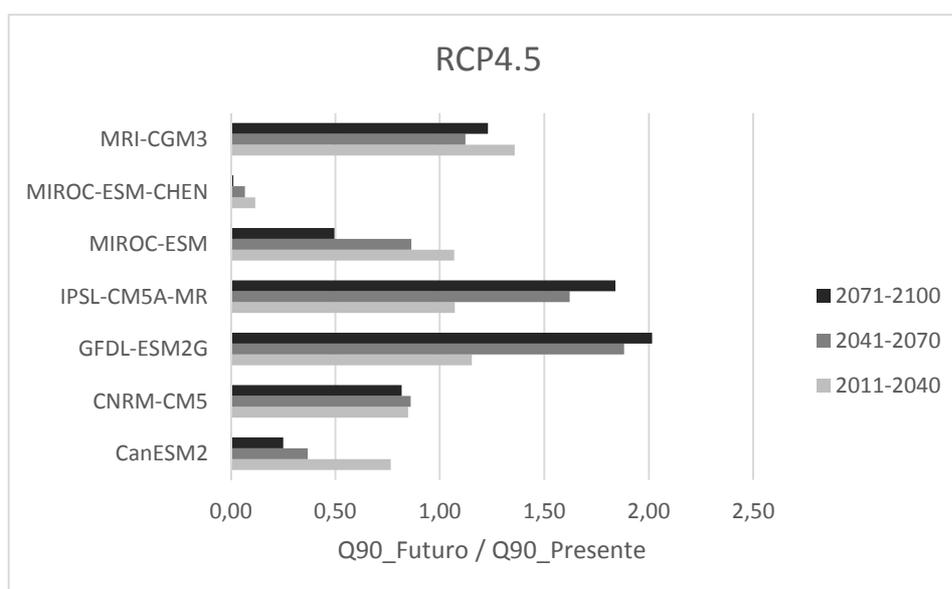
5.6.3.1 *Q₉₀ no Cenário RCP4.5*

Nesse cenário, pôde-se perceber que a razão entre a vazão com 90% de garantia correspondente aos períodos futuros (Q_{90_Futuro}) e a correspondente ao período de referência (Q_{90_presente}), ou seja: o quociente (Q_{90_Futuro} / Q_{90_Presente}), mostraram que os modelos MIROC-ESM-CHEN, CNRM-CM5 e CanESM2, projetaram redução significativa no período 2011-2100, principalmente o MIROC-ESM-CHEN, conforme mostra a Figura 70. Essa redução projetada variou de 15 a 18%, para o CNRM-CM5, de 23,5 a 75%, para o CanESM2, e de 88,3 a 99,7%, para o MIOC_ESM-CHEN, como mostrado na Tabela 25.

Os modelos MRI-CGM3, IPS-CM5A-MR e GFDL_ESM2G projetaram aumento no Q₉₀ em relação ao período de referência (Figura 70). Esse aumento variou de 7,2 a 84,1% (IPSL-CM5A-MR), de 15,4 a 101,6% (GFDL-ESM2G), e de 12,3 a 35,8% para o MRI-CGM3, sendo o período 2011-2040 o de maior aumento. O modelo MIROC-EM projetou aumento de

aproximadamente 7% para o período 2011-2040, e redução variando de 13,6 a 50,5% para o período 2041-2100, conforme mostra a Tabela 25.

Figura 70 – Razão entre a vazão com 90% de garantia para os períodos futuros (2011-2100) (Q90_Futuro), no cenário RCP4.5, e a vazão com 90% de garantia do período de referência de cada modelo (Q90_Presente).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os modelos que projetaram redução no Q₉₀ apontaram que 2071-2100 será o período de maior redução no Q₉₀, indicando que as mudanças climáticas previstas até o final do século já dão indícios desde 2011, e continuarão em processo de acentuação até o final do século XXI.

Tabela 25 – Percentual de variação de aumento e/ou redução da a vazão com 90% de garantia para os períodos futuros (2011-2100) (Q90_Futuro), no cenário RCP4.5 e a vazão com 90% de garantia do período de referência de cada modelo (Q90_Presente).

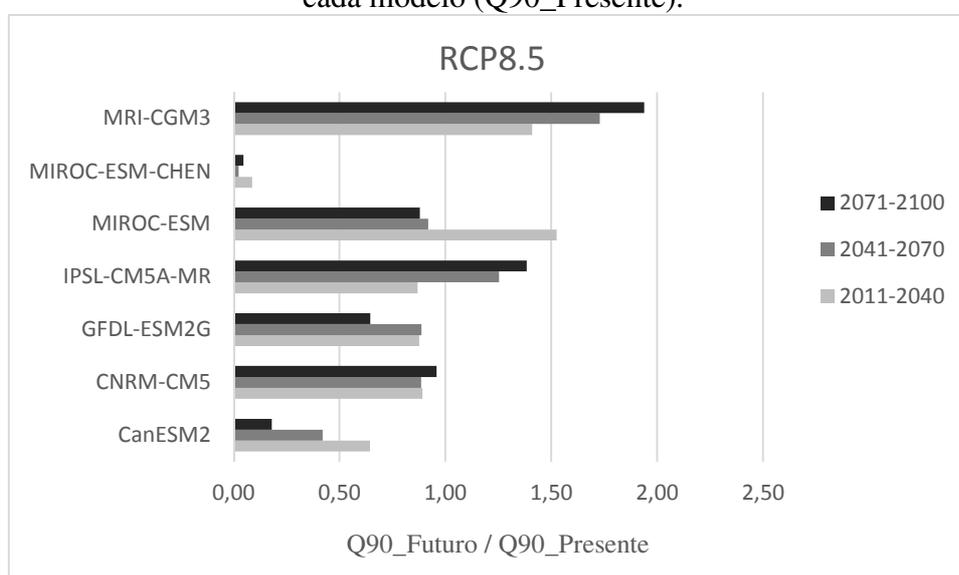
Cenário	Modelos	Variação (%)		
		2011-2040	2041-2070	2071-2100
RCP4.5	CanESM2	-23,49	-63,23	-74,90
	CNRM-CM5	-15,13	-13,86	-18,15
	GFDL-ESM2G	15,37	88,18	101,57
	IPSL-CM5A-MR	7,19	62,24	84,12
	MIROC-ESM	6,90	-13,58	-50,46
	MIROC-ESM-CHEN	-88,34	-93,27	-98,70
	MRI-CGM3	35,82	12,32	23,09

Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.6.3.2 Q_{90} no Cenário RCP8.5

Para esse cenário, quando comparada a razão entre a vazão com 90% de garantia correspondente aos períodos futuros (Q_{90_Futuro}) e aquela correspondente ao período de referência ($Q_{90_Presente}$), isto é: ($Q_{90_Futuro} / Q_{90_Presente}$), chama a atenção o fato de que a maioria dos modelos projetou redução no Q_{90} em relação ao período de referência (Figura 71), apontada por número bem maior de modelos que no cenário RCP4.5 (Figura 70).

Figura 71 – Razão entre a vazão com 90% de garantia para os períodos futuros (2011-2100) (Q_{90_Futuro}) no cenário RCP8.5 e a vazão com 90% de garantia do período de referência de cada modelo ($Q_{90_Presente}$).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O único modelo que projetou aumento de 2011-2100 foi o MRI-CGM3, que variou de 41,1 a 93,9% (Ver Tabela 26). Outras projeções de aumento foram apontadas pelos modelos MIROC-ESM, apenas no período 2011-2040, com cerca de 52,6%, e pelo IPSL-CM5A-MR, no período 2041-2100, variando em torno de 25,4 a 38,4% (Tabela 26).

Os demais modelos projetaram redução, porém, com grande significância, apontada pelo modelo MIROC-ESM-CHEN, que projetou uma redução no Q_{90} em relação ao presente acima de 91% para todos os períodos.

Tabela 26 – Percentual de variação de aumento e/ou redução da a vazão com 90% de garantia para os períodos futuros (2011-2100) (Q90_Futuro) no cenário RCP8.5, e a vazão com 90% de garantia do período de referência de cada modelo (Q90_Presente).

Cenário	Modelos	Variação (%)		
		2011-2040	2041-2070	2071-2100
RCP8.5	CanESM2	-35,56	-58,00	-82,04
	CNRM-CM5	-10,84	-11,52	-4,24
	GFDL-ESM2G	-12,43	-11,36	-35,51
	IPSL-CM5A-MR	-13,08	25,38	38,37
	MIROC-ESM	52,59	-8,04	-12,14
	MIROC-ESM-CHEN	-91,21	-97,63	-95,38
	MRI-CGM3	41,06	72,88	93,94

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Embora a maioria dos modelos tenha indicado redução, os modelos CNRM-CM5 e GFDL-ESM2G projetaram uma redução mais atenuada no Q₉₀, variando de 10 a 12% para o período 2011-2070, em relação ao presente. O período que apresentou maior redução para a maioria dos modelos foi o de 2071-2100, isto é: o final do século XXI, mostrando que, se o cenário previsto de emissões de CO₂ se concretizar, a partir de 2071, as garantias de vazão serão altamente prejudicadas, impactando ainda mais os recursos hídricos do que aquelas 2011-2070, considerando que já são detectados sinais desde o ano de 2011, gerando, com isso, grande preocupação aos tomadores de decisão, pois haverá muito mais conflitos no que se refere à alocação de água.

À medida que as concentrações de CO₂ tendem a aumentar, os impactos tendem a seguir a mesma linha, pois os modelos indicaram um impacto de redução no Q₉₀ ainda maior no cenário de concentração máxima RCP8.5.

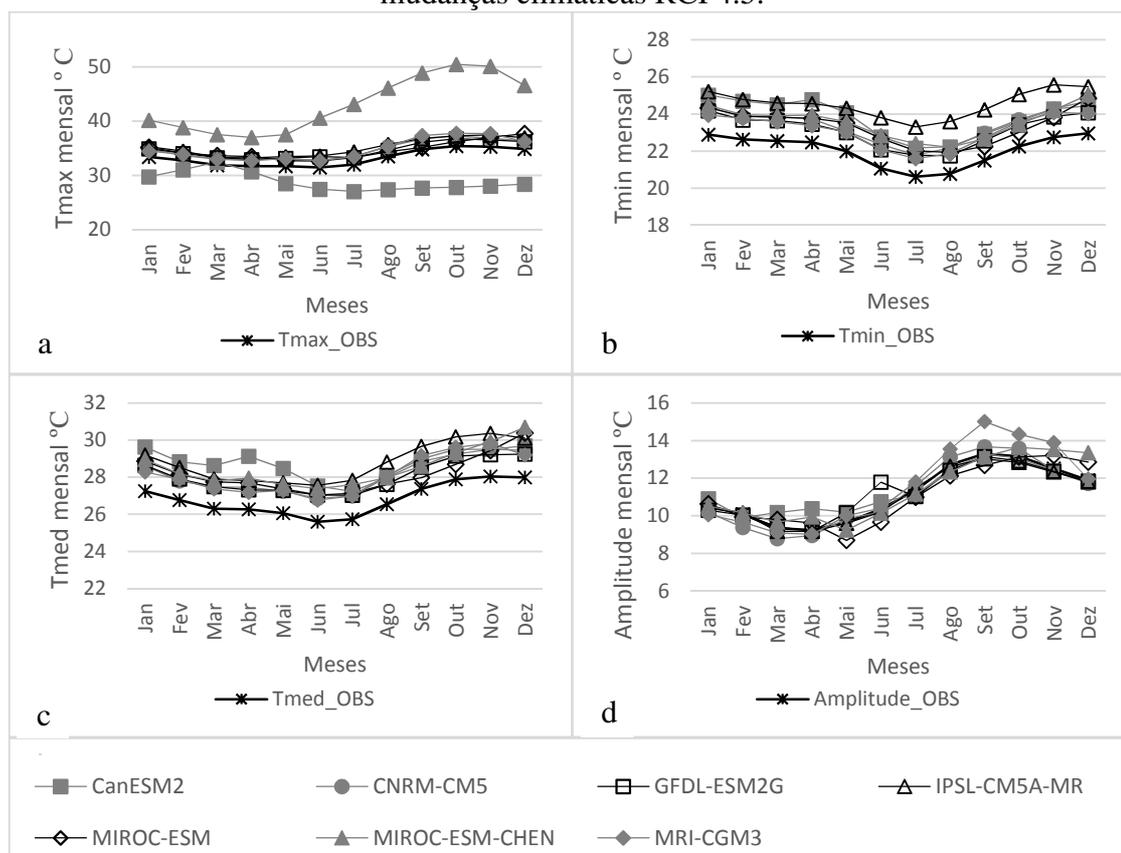
5.7 Análise da influência das variáveis nas projeções da ETo estimada por Hargreaves-Samani, no cenário de mudanças climáticas

Uma vez que as projeções da ETo mostraram-se com pouca variação de aumento, sendo alguns modelos apontando aumento mais expressivo, isto identificado nos dois cenários RCPs. Fez-se necessário a análise do comportamento das variáveis envolvidas no processo de estimativa da ETo, logo, no cenário RCP4.5, percebeu-se que algumas variáveis, como: temperatura média (Tmed) e temperatura mínima (Tmin) indicaram elevação, quando comparado às temperaturas observadas no clima presente.

No entanto, a temperatura máxima (Tmax) praticamente não indicou aumento, com exceção dos modelos MIROC-ESM-CHEN indicando aumento expressivo, principalmente no

2º semestre e do modelo CanESM2 que apontou redução da mesma (Figura 72 (a)), essa redução está relacionada à apenas um ponto de grade desse modelo sobre a região, onde justamente nesse ponto a temperatura máxima permaneceu, em média, abaixo da temperatura observada (Tmax_OBS), como mostrado na Figura 72 (a).

Figura 72 – Comportamento das variáveis envolvidas no processo de estimativa da ETo, pelo método de Hargreaves-Samani, na Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, no cenário de mudanças climáticas RCP4.5.

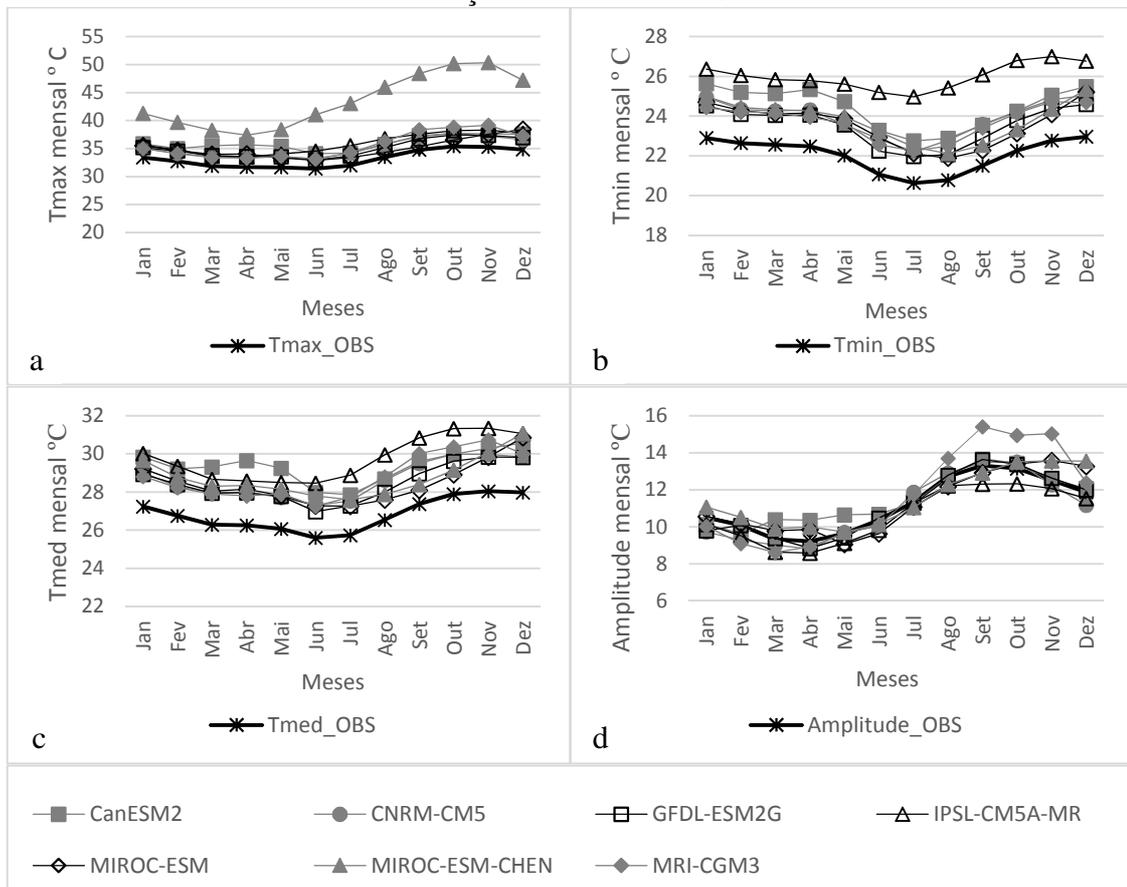


Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim verificou-se que ao se obter a amplitude térmica, exigência do método de Hargreaves-Samani, os modelos apresentaram representatividade satisfatória, pois situaram dentro do padrão observado no clima presente. Todavia, esse comportamento pode estar associado às projeções de aumento da Tmin, provocando diminuição na diferença da entre Tmax e Tmin para todos os modelos.

Portanto, mesmo com as projeções de aumento na temperatura média Figura 72 (c), a ETo obtida em função do método de Hargreaves-Samani, foi influenciada diretamente pela amplitude térmica. A mesma analogia pode ser feita para o cenário RCP8.5, onde a baixa amplitude térmica mostrou que as projeções da ETo foram diretamente afetadas pela elevação das temperaturas mínimas Figura 73 (d).

Figura 73 – Comportamento das variáveis envolvidas no processo de estimativa da ETo, pelo método de Hargreaves-Samani, na Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, no cenário de mudanças climáticas RCP8.5.



Fonte: Elaborada pelo autor.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os objetivos propostos, e através das análises descritas nos capítulos anteriores, para o Estado do Ceará e para a Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, pode-se concluir o que está disposto nos itens abaixo.

6.1 Evapotranspiração

6.1.1 Estado do Ceará

Com a análise criteriosa dos dados, foi possível estabelecer que apenas 3 Estações melhor representariam a variabilidade da ETo no Estado do Ceará, e que as mesmas teriam informações suficientes para servir de base ou referência para aplicação do processo de correção dos modelos de climáticos, além de auxiliar na comparação com projeções dos diferentes períodos e nos cenários de mudanças climáticas (RCPs).

Para a tendência na ETo estimada com dados das 3 Estações, os testes t de *Student* e MK e indicaram que, a nível semestral, a ETo não apresentou tendência, em nenhum dos dois semestres. Assim como a nível anual.

Com relação à comparação entre Penman-Monteith FAO56 e Hargreaves-Samani, a partir de dados observados e de Modelos Climáticos Globais, concluiu-se que, a partir dos dados observados, os métodos de H_(OBS) e P_2ms, tendo como referência P_(OBS), apresentaram o mesmo comportamento no 2º semestre, porém subestimando entre 5,19% e 11,2% o método de P_(OBS), sendo detectado que a diferença de médias acima de 6,4%, foi considerada estatisticamente, como diferença significativa.

No 1º semestre, de Fevereiro a Maio, apenas H_(OBS) superestima P_(OBS) entre 5,1 e 10,7%, e após aplicação do teste da diferença de médias, foi verificado que, as diferenças das médias mensais, entre os dois métodos, são consideradas significantes, quando assinalam percentual acima de 7%. Assim, para estimativa da ETo no Ceará, pelo percentual de variação entre os métodos, qualquer dos três pode ser adotado com segurança. Na ETo a nível anual, quando considerando a velocidade do vento de 2m/s, a ETo estimada por P_2ms subestima, em todos os anos, à apontada pelos métodos P_(OBS), entre de 3,49% e 12,18%, e H_(OBS) variando de 0,09% a 9,23%.

Analisando a variabilidade, os gráficos *boxplot* indicaram que os três métodos apresentaram baixa variabilidade da ETo para os dois semestres. A partir dos dados modelados,

de maneira geral, os modelos com dados não corrigidos (brutos) não conseguiram identificar a variabilidade própria da ETo observada. Porém, o método de correção Gama mostrou-se eficaz, e logo após a correção, os dados apresentaram melhoria na variabilidade, quando comparados aos observados.

Em relação à identificação das mudanças de clima em termos de Evapotranspiração Potencial, foi possível concluir que as alterações climáticas previstas para o final do século XXI apontam para aumento da ETo, porém pouco significativo, uma vez que a maioria dos modelos manteve suas projeções pouco acima da ETo de clima presente, em ambos os semestres, em média, menor que 10%. Apenas quatro modelos projetaram aumento da ETo de maneira um pouco mais expressiva.

Para o 1º semestre, projetaram aumento da ETo: o modelo CanESM2, no período 2011-2100, principalmente no mês de Março, pelos três métodos analisados, e os modelos MIROC-ESM e MIROC-ESM-CHEN, no período de Março a Dezembro, apontado pelo método de Penman-Monteith-FAO56.

Para o 2º semestre, projetaram aumento da ETo: o modelo MRI-CGM3, pelos três métodos analisados, principalmente do período 2071-2100.

Do período 2011-2040, as projeções de aumento da maioria dos modelos mantiveram-se entre 1% e 6% para o 1º semestre, e entre 2% e 10% para o 2º semestre, sendo considerado, através da aplicação do teste de hipótese da diferença de médias, um aumento estatisticamente significativo, um percentual acima de 5,5%, para os dois semestres. De 2041-2070, o aumento variou entre 1% e 10% no 1º semestre, e de 1% a 15% para o 2º semestre, sendo considerado aumento estatisticamente significativo, um percentual acima de 4,6%. Do período 2071-2100, apenas a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith-FAO56 projetou, para Abril a Junho, o aumento, variando entre 1% e 30% no 1º semestre, e entre 1% a 23% para o 2º semestre, sendo considerado aumento estatisticamente significativo, um percentual acima de 5%. Apenas os modelos IPSL-CM5A-MR e MRI-CGM3 projetaram redução da ETo, pelo método de Hargreaves-Samani no período 2071-2100, assim como nos cenários RCPs.

6.1.2 *Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe*

Em relação às médias da ETo, de maneira geral, as projeções dos modelos não indicaram aumento significativo para o período 2011-2100. Alguns modelos praticamente não registraram aumento, mantendo grande semelhança com a ETo observada. Apenas dois modelos

mostraram que a ETo pode aumentar em relação ao dado observado, com valores mais expressivos. São eles: o modelo CanESM2, no 1º semestre, em especial, de Fevereiro a Maio, e o MRI-CGM3, de Julho a Dezembro.

De 2011 a 2040, com exceção do modelo CanESM2, que projetou aumento médio da ETo em Março e Abril, não ultrapassando 12% nos dois RCPs, e o modelo GFDL-ESM2G, com 15,3% em Março no RCP8.5, as projeções dos demais modelos, em média, não ultrapassam os 7% nos dois RCPs.

Para 2041-2070, no cenário RCP4.5, apenas os modelos CanESM2 e MRI-CGM3 projetaram aumentos na ETo, para o 1º semestre menor que 20% (CanESM2), e para o 2º semestre, variando de 6% a 13% (MRI-CGM3). Para o cenário RCP8.5, foi registrado apenas um aumento médio de 3%, para os mesmos períodos e os dois modelos. Os demais modelos registraram projeção de aumento menor que 9%.

Para o período 2071-2100, apenas os modelos CanESM2 e MRI-CGM3 projetaram aumentos significativos, todavia esse aumento tornou-se pouco expressivo quando comparado ao mesmo período no cenário anterior, o RCP4.5, pois, no RCP8.5, a ETo projetada pelo CanESM2 para Março sofreu um acréscimo de 9,4%, para Abril, de 24,9% e, para Maio, de 13,5%. O modelo MRI-CGM3 projetou acréscimo de 9,4% em Setembro, 13% em Outubro e 10,9% para Novembro, e os demais modelos praticamente não sofreram alteração significativa de aumento.

Com relação à variabilidade, pôde-se concluir que todos os modelos, mesmo em face de todos os procedimentos realizados, como correção de viés e de ajuste pela distribuição Gama, continuaram apresentando grande dificuldade de representar a variabilidade climatológica da ETo, e com as projeções subestimando a variabilidade do clima presente.

De maneira geral, foi possível concluir também que, se as alterações climáticas previstas pelos modelos se confirmarem até o final do século, a ETo da região da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe não sofrerá aumento expressivo, uma vez que os modelos, em sua maioria, projetaram pouca elevação em relação à ETo observada.

Essa informação foi confirmada através da análise do impacto das alterações climáticas nas variáveis envolvidas na estimativa da ETo pelo método de Hargreaves-Samani, onde conclui-se que, mesmo com projeções de aumento da temperatura média, a baixa elevação da ETo pode estar associada às projeções de aumento da temperatura mínima, provocando diminuição na amplitude térmica (diferença entre temperatura máxima e mínima) para todos os modelos. Portanto, as projeções de aumento pouco expressivo da ETo na região da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, visto nos dois cenários RCPs, foi influenciada diretamente pela

diminuição da amplitude térmica.

6.2 Precipitações na Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe

Com relação às precipitações, concluiu-se que, para ambos os cenários RCPs, em relação ao clima presente, apenas os modelos MRI-CGM3 e IPSL-CM5A-MR projetaram aumento bastante expressivo, ao passo que o CanESM2 e o MIROC-ESM-CHEM projetaram redução significativa, principalmente este último. Já os demais modelos projetaram aumento e/ou diminuição discretos, permanecendo praticamente em torno das precipitações de clima presente.

Em ambos os cenários de concentrações de CO₂ (RCPs), as precipitações deverão ser impactadas praticamente com a mesma intensidade, exceto para o período 2041-2100 no cenário RCP8.5, para o qual apenas o modelo MRI-CGM3 projetou os maiores acumulados para Fevereiro, com aproximadamente 281 mm (2041-2070), contra 116,5 mm da Pr_OBS (precipitação observada), e em Março com 289,7 mm (2071-2100), contra 152,1 mm observados.

Em relação à variabilidade das precipitações observadas no clima presente, os modelos projetaram:

- i) Para o período 2011-2040, os modelos projetaram uma pequena variabilidade, mantendo-se em torno da variabilidade observada;
- ii) De 2041 a 2070, os modelos projetaram aumento na variabilidade para Fevereiro em ambos os RCPs, e para o restante dos meses, se mantiveram em torno do observado. Com exceções em Maio, Junho e Outubro, em que apenas um modelo em cada mês projetou aumento no RCP4.5; e
- iii) De 2071 a 2100, apenas no cenário RCP4.5, a variabilidade da ETo foi projetada em torno do padrão observado, exceto para o IPSL-CM5A-MR, que superestimou os dados observados em praticamente todos os meses do 1º semestre.

Portanto, para o período 2011-2100, as alterações climáticas projetadas pelos modelos deverão impactar substancialmente as precipitações, uma vez que, apenas um ou dois modelos, projetaram aumento expressivo, e o restante, em sua maioria projetaram um aumento não-significativo ou uma redução expressiva. Portanto, deve existir uma preocupação maior no que diz respeito ao acúmulo de água nos reservatórios, afetando diretamente o setor de recursos

hídricos. Desta forma, políticas estratégicas devem ser implementadas com antecedência, uma vez que os modelos já indicam sinais de alterações climáticas nessa variável, já desde 2011.

6.3 Vazões na Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe

Caso as alterações climáticas previstas pelos cenários (RCPs) se concretizem, levando em consideração as vazões na bacia do Alto Jaguaribe e os resultados apresentados, é possível concluir que:

- i) A maioria dos modelos já vem mostrando sinais, desse 2011, e estes são plenamente suficientes para se levar à conclusão de que as alterações climáticas impactarão de maneira expressiva a redução das vazões até o final do século XXI;
- ii) Dos sete modelos analisados, quatro apontaram redução de vazões para o RCP4.5 e cinco para o cenário RCP8.5, ambos com redução significativa na região da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe;
- iii) Três modelos, GFDL-ESM2G, MRI-CGM3 e IPSL-CM5A-MR, indicaram projeção de aumento das vazões no período 2011-2100, para o RCP4.5, sendo mais contundente no período 2041-2100; e
- iv) Dois modelos, MRI-CGM3 e IPSL-CM5A-MR, indicaram projeção de aumento das vazões no período 2011-2100, no RCP8.5, sendo este aumento mais forte no período 2041-2100.

Pelo coeficiente de assimetria, as vazões deverão apresentar maior frequência entre os valores mais baixos, e conseqüentemente, as vazões mais altas deverão apresentar menor frequência, sendo este um grave problema para gestão dos recursos hídricos, principalmente para controle e liberação de água para fins diversos.

6.4 Potencial de Alocação (Q₉₀)

As alterações climáticas previstas pelos modelos até final do século XXI impactarão nos dois cenários RCPs, com a maioria dos modelos projetando redução no Q₉₀ em relação ao presente, principalmente no final do século, no período 2071-2100, sendo mais forte a expressão de redução no RCP8.5, período de concentração máxima de CO₂.

Com relação às projeções de aumento, apenas três modelos projetaram aumento significativo no Q_{90} para o período 2011-2100, no RCP4.5, e somente um modelo apontou aumento para o cenário RCP8.5.

6.5 Recomendações para estudos futuros

- ~ Testar esta mesma metodologia, como um número maior de modelos;
- ~ Utilizar dados de reanálise, uma vez que são os que mais se aproximam da realidade, e comparar ao trabalho exposto;
- ~ Utilizar dados de satélites e/ou de radar como forma de preenchimento das falhas; e
- ~ Alertar aos tomadores de decisão sobre a importância de trabalhos desta natureza, pressionando-os sobre a melhora na capacidade de coleta, ampliando a rede de coleta das informações sobre as variáveis envolvidas nesse tipo de estudo, a fim de melhorar a confiabilidade da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ADAM, K. N. **Análise dos impactos de mudanças climáticas nos regimes de precipitação e vazão na Bacia do Rio Ibicuí.** 2011. 147f. Dissertação de Mestrado. (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- ALENCAR, L. P. *et al.* Tendências recentes nos elementos do clima e suas implicações na evapotranspiração da cultura do milho em Viçosa – MG. **Eng. Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 4, p.631-642, 2011.
- ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Eng. Agríc.** Jaboticabal, v.35, n.1, p.39-50, jan./fev. 2015
- ALEXANDRE, A. M. B. *et al.* Regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos. *In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20-24 Nov., Anais...* João Pessoa, 2005.
- ALLEN, R. G. *et al.* Operational Estimates of reference Evapotranspiration. **Agron. J.**, 81:650-662, 1989.
- ALLEN, R. G. *et al.* **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.** Rome: FAO, Irrigation and drainage, paper 56, 1998. 300p.
- ALLEN, R. G. *et al.* Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p. 650-662, 1989.
- ALLEN, R. G. *et al.* An update for the definition of reference evapotranspiration. **ICID Bulletin**, v.43, p.1–34, 1994.
- ALLEN, R. G. 2003. **Crop coefficients.** *In: Stewart, B.A., Howell, T.A. (Eds.), Encyclopedia of Water Science.* Marcel Dekker Publishers, New York, pp. 87–90.
- AMORIM, A.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B. 2011. Evapotranspiração de Referência Estimada por Métodos de Dados Mínimos Climáticos para o Estado de Alagoas. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. Trabalho completo,* Guarapari, SBA, CD-ROOM.
- ANDRADE, J. A. **A água no sistema climático.** (Apontamentos para aulas de MICROCLIMATOLOGIA DOS HABITATS). Universidade de Évora – Departamento de Geociências, ÉVORA, 2011.
- ARAÚJO FILHO, P. F.; CABRAL, J. J. S. P.; AZEVEDO, J. R. G. Considerações sobre a variabilidade espacial da precipitação na bacia do riacho Gameleira em Pernambuco. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17, 2007, São Paulo-SP. Anais,* Porto Alegre: ABRH, 2007. CD-ROM.
- ASSIS, F. N.; ARRUDA, H. V.; PEREIRA, A. R. **Aplicações de estatística à climatologia.** 1. ed. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 1996. 161 p.

Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal, Guia RELACRE 13. **Validação de Métodos Internos de Ensaio em Análise Química**, Fevereiro 2000, RELACRE.

BARROS, F. V. F. **Uso de algoritmos evolucionários na calibração de modelos hidrológicos e na operação de sistemas de reservatórios**. 2007. 181 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará, FORTALEZA – CEARÁ, JULHO – 2007.

BARROS, V. R. *et al.*, 2007. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica-RJ, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA*, XV, Aracaju, 2007. **Trabalho completo**, Aracaju, SBA, CD-ROOM.

BATTISTON, C. C.; TUCCI, C. E. M. **Evaporação e evapotranspiração**. Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, UFRGS, 2003. Notas de aulas. Disponível em: <<http://www.iph.ufrgs.br>>. Acesso em: 11 Jun. 2007.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 1995.

BEZERRA, B. G. **Balço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no cariri cearense através do algoritmo SEBAL**. 2006. 147p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, 2006.

BONOMO, R. **Análise da Irrigação na cafeicultura em áreas de cerrado de Minas Gerais**. 1999. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

BORGES, A. C.; MEDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na bacia Rio Jacupiranga, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 11, n. 3, p. 299-300, 2007.

BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. O. **Determining Water Requirements in Irrigated areas from Climatological and Irrigation Data**. Soil Conservation Service. Washington, D. C. 1950.

BUCHIANERI, V. C. **Geração da série histórica de vazão por meio do modelo SMAP: subsídio para o plano de manejo da bacia do Rio Grande de Ubatuba**. 2004. 105 p. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP, Piracicaba – SP, 2004.

CARVALHO, D. F. *et al.*, 2006. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica-RJ, utilizando lisímetro de pesagem. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 14(2): 1-9.

CARVALHO, D. F. *et al.*, 2011. Manejo da irrigação associada a coberturas mortas vegetais no cultivo orgânico da Beterraba. **Engenharia Agrícola**, 31(2): 269-277.

CAMARGO, A. P. & CAMARGO, M. B. P. **Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial**. **Bragantia**, Campinas, v.59, n.2, p.125-137, 2000.

CARDOSO, G. M. **Uso de um modelo regional de clima-vegetação para estimativa dos componentes da evapotranspiração sob condições climáticas atuais e futuras de aquecimento global**. 2009. 75f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais – Brasil, 2009.

CARVALHO, L. G. *et al.* FAO Penman-Monteith equation for reference evapotranspiration from missing data. Volumen 31, No 3. Páginas 39-47 **IDESIA** (Chile) Septiembre-October, 2013.

CHOW, V. T. **Handbook of Applied Hydrology**. Nova York: McGraw-Hill, 1964.

CAPONI, G. R.; SILVA, B. C. **Calibração Automática do modelo SMAP Mensal por Algoritmos Genéricos**. PCH Notícias & SHP News, v. 13, p. 26-31, 2011.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 303-307, 2005.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Evapotranspiração de referência com base na radiação solar global estimada pelo método de Bristow-Campbell. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 619-626, 2010.

COSTA, V. S.; PAIVA, C. M.; SOUZA, A. S. 2011. Comparação de Métodos para Estimativa da Evapotranspiração na Bacia do Córrego Sujo em Teresópolis Rio de Janeiro – Brasil. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. **Trabalho completo**, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

DINIZ, L. S.; CLARKE, R. T. Regionalização de parâmetros de modelo chuva-vazão usando redes neurais. *In*: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001, Aracaju, SE. **Anais**. Rio de Janeiro: ABRH, 2001.

DOORENBOS, J.; PRUITT W. O. Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper** 24. FAO. Rome. 1977.

FAO56 na estimativa da evapotranspiração de referência usando dados de temperatura do ar no semiárido. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. **Trabalho completo**, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

ESTEVES, B. S. *et al.* Avaliação do Kt para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em Campos dos Goytacazes, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14(3): 274-278, 2010.

FERNANDES, D. S.; SARAIVA, I.; MICHILES, E. 2011. Estimativa de Evapotranspiração de Referência pelo Método de Hargreaves para Condições Úmidas. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. **Trabalho completo**, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

FERNANDES, L. C. **Avaliação de diversas equações empíricas de evapotranspiração. Estudo de caso: Campos dos Goytacazes e Ilha de Fundão-RJ**. 2006. XVIII, 142 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2006)

- FIETZ, C. R.; SILVA, F. C.; URCHEI, M. A. Estimativa da evapotranspiração de referência diária para a região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 250-255, 2005.
- FOOLADMAND, H. R.; ZANDILAK, H.; RAVANAN, M. H. 2008. Comparison of different types of Hargreaves equation for estimating monthly evapotranspiration in the south of Iran. **Archives of Agronomy and Soil Science**, 54: 321-330.
- GAVILÁN, P. *et al.* Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. **Agricultural Water Management**, v.81, p.257-281, 2006.
- GOOSSENS, C.; BERGER, A. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. **Annales Geophysicae**, Berlin, v. 4, n. B4, p. 385-400, 1986.
- HARGREAVES, G. H. **Climate and irrigation requirements for Brazil**. Logan, Utah State University, 1977. 44p
- HARGREAVES, G.H. & SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.
- HAYHOE, K.; STONER, A.; GELCA R. Climate change projections and indicators for Delaware. **ATMOS Research & Consulting**, December 2013.
- HENRIQUE, F. A. N.; DANTAS, R. T. Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande, Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 11, n. 6, p. 594-599, 2007.
- HUBER, D.G.; GULLEDGE, J. **Extreme weather and climate change: Understanding the link, managing the risk**. Pew Center on Global Climate Change (2011).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007a. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Cambridge University Press, Cambridge. 133p.
- JABLOUN, M.; SAHLI, A. Evaluation of FAO56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data application to Tunisia. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 6, p. 707-715, 2008.
- JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of Irrigation Drainage Division**, ASCE, New York, v.89, n.1, p.15-41, 1963.
- JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. "Climate change in the outh American Monsoon System: present climate and CMIP projections". **Journal of Climate**, v.26, n:17, pp.6660–6678, 2013.
- KENDALL, M. G., Rank Correlation Methods, 4th ed., Charles Griffin: London, 1975.
- KHOOB, A. R. Comparative study of Hargreaves's and artificial neural network's methodologies in estimating reference evapotranspiration in a semiarid environment. **Irrigation Science**, New York, v. 26, n. 3, p. 253-259, 2008.

KUNKEL, K. E.; COAUTHORS, 2013: Monitoring and understanding changes in extreme storm statistics: State of knowledge. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94, 499–514.

LIMA, E. P. **Evapotranspiração de referência de Penman- Monteith, padrão FAO (1998), a partir de dados de temperatura máxima e mínima de Minas Gerais**. Minas Gerais, 2005. 67f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, UFV.

LACERDA, Z. C.; TURCO, J. E. P. Estimation methods of reference evapotranspiration (ET_o) for Uberlândia – MG. *Engenharia Agrícola*, v.35(1): 27- 38, 2015.

LOPES, J. E. G.; BRAGA JR., B. P. F.; CONEJO, J. G. L. “Simulação Hidrológica: Aplicações de um Modelo Simplificado”. In: *Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, v.2, 42-62, Fortaleza, 1981.

LOPES, J. E. G. **Manual modelo SMAP**, 1999, 19 p. Disponível em: 200.144.189.97/phd/LeArq.aspx?id_arq=3596.

MACHADO, R. E.; MATTOS, A. Avaliação do desempenho de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 193-197, 2000.

MANN, H. B., Non-parametric test against trend, *Econometrica*, 13, 245-259, 1945.

MARTINS, E. S. P. R. *et al.* **Estudo de Adaptação do Planejamento e da Operação dos Recursos Hídricos à Variabilidade e Mudanças Climáticas na Bacia Estendida do Rio São Francisco** - Relatório Final do Estudo de Cooperação Técnica entre Agência Nacional de Águas e Universidade Federal do Ceará. Novembro de 2016, 54 páginas.

MATERÁN, F. J. V. **Tecnologia do irrigâmetro aplicada em minilímetro e lisímetro com lençol freático constante para determinação da evapotranspiração de referência**. 2006. 110f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, VIÇOSA, MINAS GERAIS – Brasil, 2006.

MENDONÇA, J. C. *et al.* Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande-PB, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.

MENDES, R. S. **Determinação da Evapotranspiração por métodos diretos e indiretos e dos coeficientes de cultura da soja para o Distrito Federal**. Universidade de Brasília. Brasília, DF. 2006. (Dissertação de Mestrado).

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206p.

MIRANDA, J. H. *et al.* Água e solo. In: *Irrigação*. Piracicaba: FUNEP, v.1, p.1-62.2001.

MOHAWESH, O. E. Spatio-temporal calibration of Blaney-Criddle Equation in Arid and Semiarid environment. *Water Resources Management*, Amsterdam, v. 24, n. 10, p. 2187-2201, 2010.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment: Rothmsted Experimental Station. Harpendem, Herts, v.19, p.205-234, (**Publications in Climatology**, v. XI, n.3). 1965.

MORAN, J. M.; MORGAN, M. D. Meteorology: The Atmosphere and the Science of Weather. 5ª Edição. **New Jersey**: Prentice-Hall, 1997. 530p.

MOURA, A. R. C. **Estimativa da Evapotranspiração de Referência em bacia experimental na região Nordeste**. 2009. 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-Pernambuco, Novembro de 2009.

MOURA, A. R. C. *et al.* Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no Estado de Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.2, 181 - 191, 2013.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. A. **Hidrologia estatística** - Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Mudanças climáticas e Amazônia, **Cienc. Cult.** São Paulo, v. 59, n 3, Jul-Set. 2007.

NUNES, F. M. S. *et al.* Modelagem hidrológica via SMAP para estimativa de vazões mensais na bacia do rio Piancó. **Revista Verde** (Pombal - PB - Brasil), v.9, n.3, p.289-295, jul-set, 2014. Disponível em: <<http://revista.gvaa.com.br>>.

OLIVEIRA, M. A. A.; CARVALHO, D. F. Estimativa da evapotranspiração de referência e da demanda suplementar de irrigação para o milho (*Zea mays* L.) em Seropédica e Campos, Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2(2): 132-135, 1998.

OLIVEIRA, J. B.; ARRAES, F. D. D.; VIANA, P. C. Methodology for the spatialisation of a reference evapotranspiration from SRTM data. **Revista Ciência Agronômica**, v.44(3): 445-454, 2013.

OTSUKI, R. G. (2015). **Estimativa de Séries Anuais de Evapotranspiração Real e Vazão em Bacias sem Monitoramento Fluviométrico com Base nas Hipóteses de Budyko**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-170/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p.

PENMAN, H. L. (1948). Natural Evaporation from Open Ware, Bare Soil and Grass. **Proc. Roy. Soc. London**, A 193:120-126.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 2002. 478p.

PETERSON, T. C. *et al.*, 2013: Monitoring and understanding changes in heat waves, cold waves, floods and droughts in the United States: State of knowledge. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 94, 821-834, doi:10.1175/BAMS-D-12-00066.1

PILAU, F. G. *et al.* Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência nas localidades de Frederico Westphalen e Palmeira das Missões, **RS. Ciência Rural**, vol. 42, núm. 2, febrero, 2012, pp. 283-290. Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria, Brasil.

POPOVA, Z.; KERCHEVA, M.; PEREIRA, L. S. Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data. Application to South Bulgaria. **Irrigation and Drainage**, v. 55, n. 2, p. 201-215, 2006.

PORTELA, M.M. *et al.* Tendências em séries temporais de variáveis hidrológicas. **Associação Portuguesa de Recursos Hídricos (APRH)**, v. 32, n. 1, p. 43-60, 2011.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, 100(2): 81-92, 1972.

QUEIROZ, M. G. *et al.*, 2011. Desempenho do método de Penman-Monteith Silva, V.J.; Carvalho, H.P.; Silva, C.R. & Pereira, W.J.S. 2011. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Monte Alegre de Minas-MG. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XVII, Guarapari, 2011. **Trabalho completo**, Guarapari, SBA, CD-ROOM.

RADIN, B. *et al.* Estimativa da evapotranspiração da cultura do milho pelo método de Penman-Monteith modificado. **Revista brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n.2, p.185-191, 2000.

ROQUE, R. O.; SANSIGOLO, C. A. Estimativas de evaporação do lago de Taquarucu, SP, usando um modelo conceitual de relação complementar de Morton. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11. 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** 2000. p. 1515-1523. CD-ROM, Papel. (INPE-12467-PRE/7769).

SAMANI, Z. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. **Journal of Irrigation and Drainage**, New México, v. 126, n.4, p. 265-267, jul/ago, 2000.

SILVA, J. R. L. *et al.* Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Fernando de Noronha. **Irriga**, v.19(3): 390-404, 2014b.

SANTOS, F. X.; RODRIGUES, J. J. V.; MONTENEGRO, A. A. A.; MOURA, R. F. Desempenho de lisímetro de pesagem hidráulica de baixo custo no semi-árido nordestino. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p.115-124, 2008.

SANTOS, D. J. **Determinação e validação do coeficiente de cultura e estimativa a evapotranspiração para gramínea brachiaria brizantha no Estado de Rondônia.** Trabalho de Conclusão de Curso (Departamento de Matemática e Estatística), Fundação Universidade Federal de Rondônia Ji-Paraná, 2010.

SEN, P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. **J. Am. Stat. Association**, v. 63, p. 1379-1389, 1968.

SENTELHAS, P. C. Class A pan coefficients (K_p) to estimate daily reference evapotranspiration (ET_o). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.7, n.1, p.111-115, 2003.

SILVA, V. P. R. *et al.* Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 9, n. 4, p. 547-553, 2005.

SILVA, M. G. *et al.* Estimativa da evapotranspiração de referência pela equação de Hargreaves-Samani no Estado do Ceará, Brasil. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 9(2): 132-141, 2015.

SILVA, L. C.; RAO, T. V. R. Avaliação de métodos para estimativa de coeficientes da /cultura de amendoim. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.1, p.128-131, 2006.

SILVA, M. G. *et al.* Avaliação da evapotranspiração de referência por Penman-Monteith usando dados climáticos mínimos no sertão do Ceará. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 7, n. 3, p. 284-293, Setembro-Dezembro, 2013.

SILVEIRA, C. S. *et al.* AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODELOS DO CMIP5 QUANTO À REPRESENTAÇÃO DOS PADRÕES DE VARIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NO SÉCULO XX SOBRE A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL, AMAZÔNIA E BACIA DO PRATA E ANÁLISE DAS PROJEÇÕES PARA O CENÁRIO RCP8.5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.3, 317 - 330, 2013

SILVEIRA, C. S. *et al.* Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH** vol. 21 nº .2 Porto Alegre abr./jun. 2016 p. 416 - 428

SOUZA, I. F. *et al.* Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do Estado do Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.6, p.633-644, 2010.

SOUZA, A. S. P. **Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para fins de manejo de irrigação**. 2011. 84p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

SMITH, M. *et al.* **Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO, 1990. p. 59.

SNEYERS, R. **Sur l'analyse statistique des séries d'observations**. Gênevê: Organisation Météorologique Mondiale, 1975. 192p. (OMN, Note Technique, 143).

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. **Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1995. 49 p. (EMBRAPA-CNPAP. Documentos, 55).

TAO, H. *et al.* Trends in extreme temperature indices in the Poyang Lake Basin, China. **Stoch. Environ. Res. Risk Asses.**, v. 28, p. 1543-1553, 2014.

TAYT-SOHN, F. C. O. **Avaliação dos impactos das mudanças climáticas na aptidão para o cultivo da cana-de-açúcar na região da bacia hidrográfica do Paranaíba.** 2014. 84 p. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2014.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach Toward A Rational Classification Of Climate. *Geographical Review*, **New York**, v.38, n.1, p.55-94, 1948.

TUCCI, C. E. M. (Org). **Hidrologia: ciência e aplicação.** 3 ed. Porto Alegre: Ed. Da UFRGS/ABRH, 2004. 943p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v. 4).

TURCO, J. E. P.; PERECIN, D.; PINTO JÚNIOR, D. L. P. Influência da acurácia de instrumentos de medidas na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. Botucatu, SP. **Irriga**, v.13, n.1, p.63-80, 2008.

TRAJKOVIC, S. Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, p.38–42, 2007.

TRAJKOVIC, S.; KOLAKOVIC, S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. **Water Resource Management**, Amsterdam, v. 23, n. 14, p. 3057-3067, 2009.

VAN VUUREN; D. P. *et al.* The representative concentration pathways: an overview”. **Climatic Change**. v. 109, n. 1-2, pp. 5-31, 2011.

VIAGEM, S. J. **Simulação do impacto das mudanças climáticas sobre a agricultura irrigada da região de Sussundenga – Moçambique.** 2013. 102 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, Março de 2013.

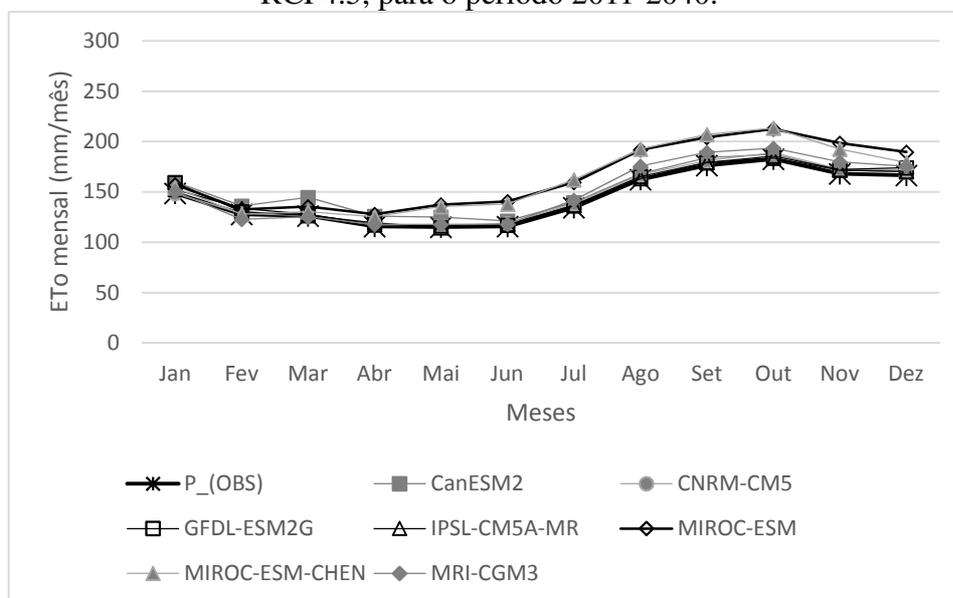
VILLELA, S. M.; MATOS, A.. **Hidrologia Aplicada**, São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil, 1975.

WREGGE, M. S.; LUNARDI, D. M. C. Evapotranspiração e coeficientes de cultura (Kc) do crisântemo (*Dendranthema grandiflora* var. *Polaris Amarelo*). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 14, n. 1, p. 43-52, 2006.

APÊNDICE A

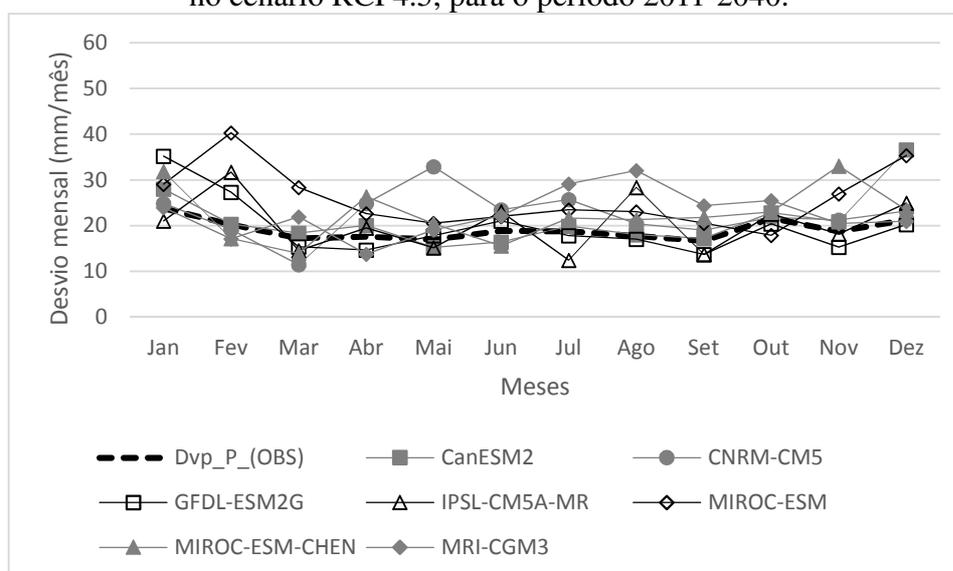
FIGURAS REFERENTES À ETo MENSAL NO ESTADO DO CEARÁ

Figura 74 – ETo mensal estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.



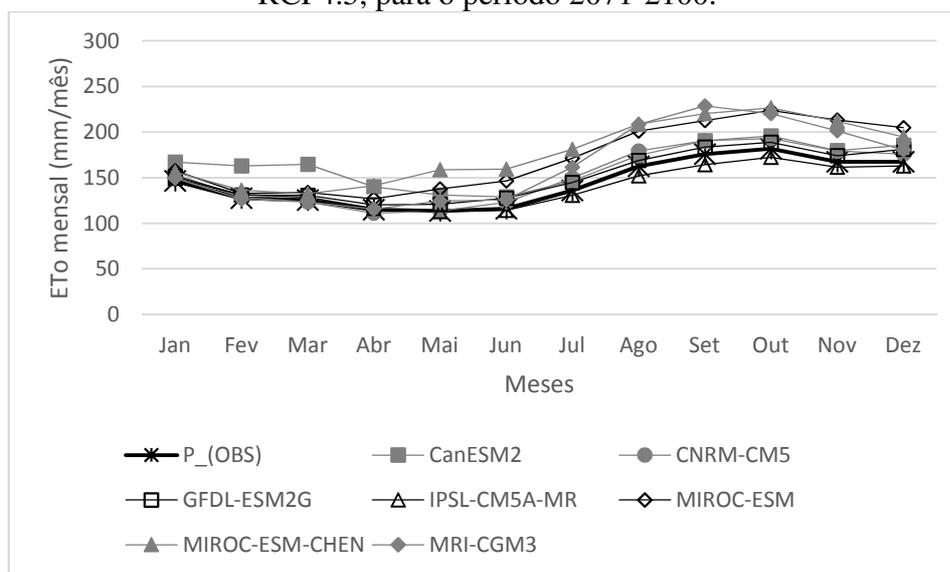
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 75 – Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.



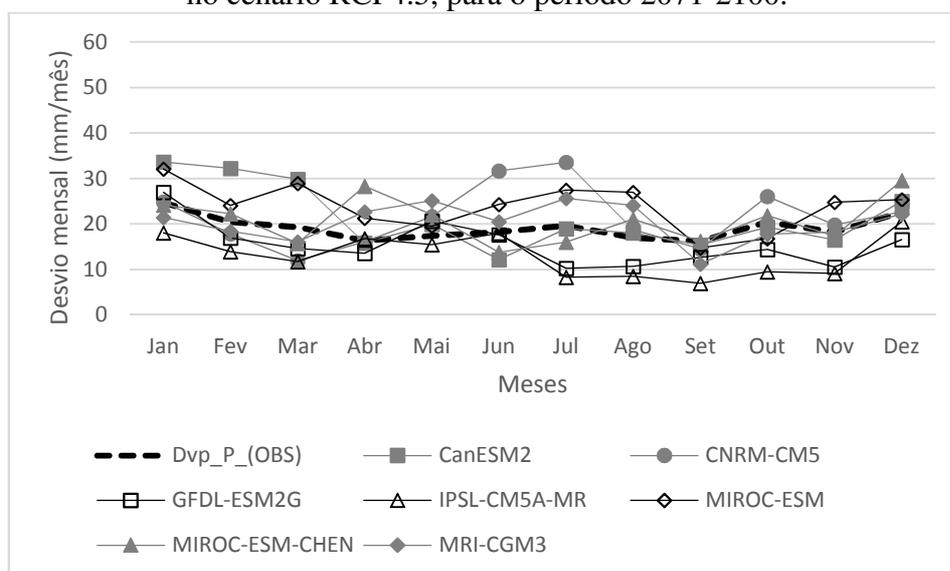
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 76 - ETo mensal estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.



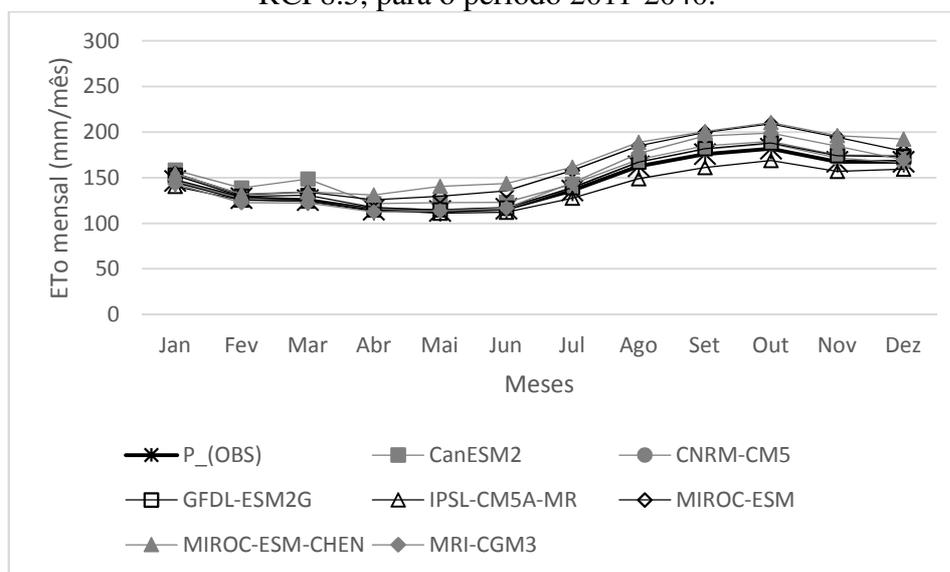
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 77 – Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.



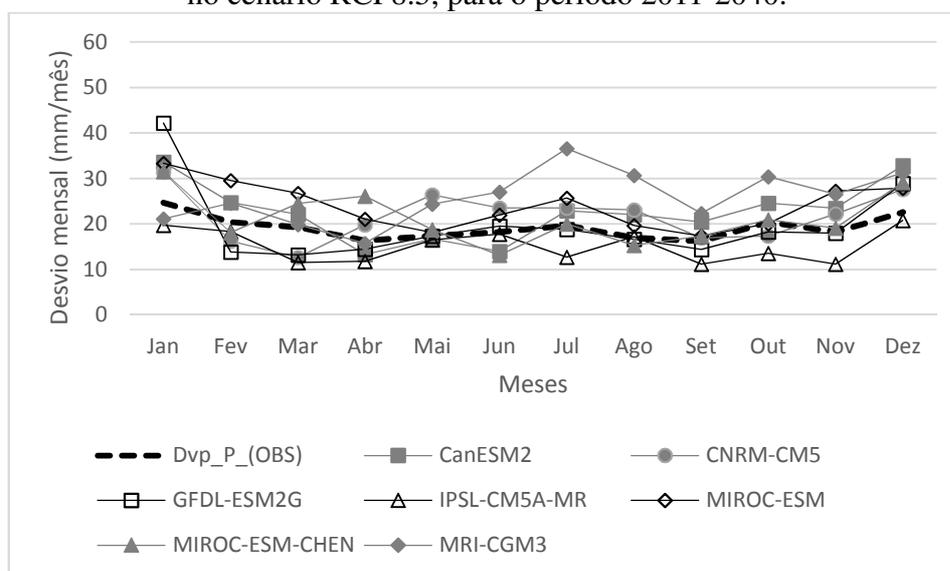
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 78 - ETo mensal estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.



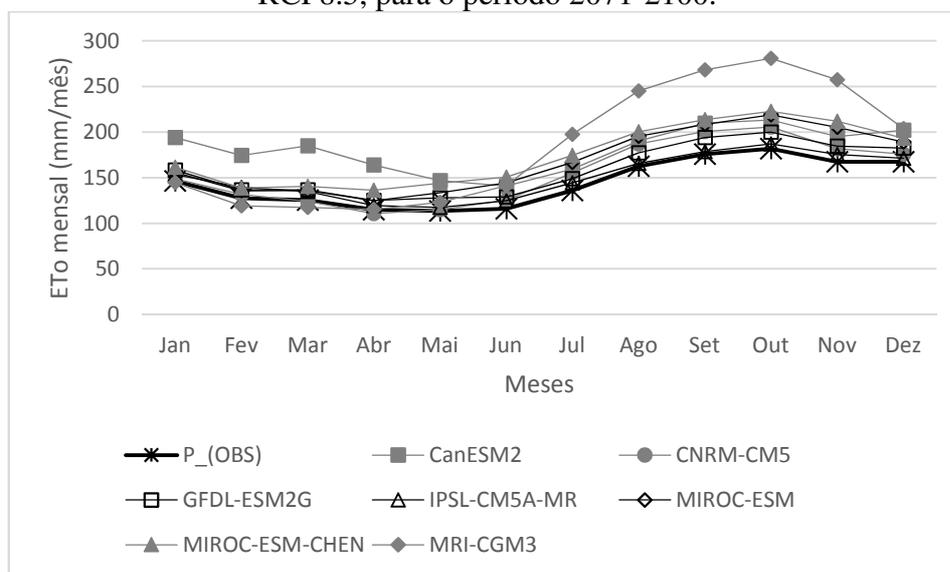
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 79 – Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.



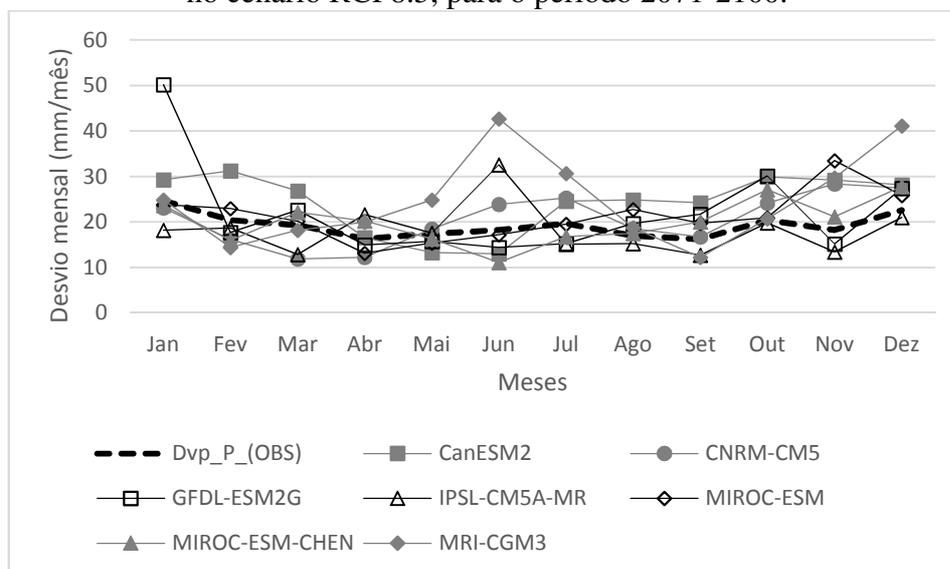
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 80 - ETo mensal estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.



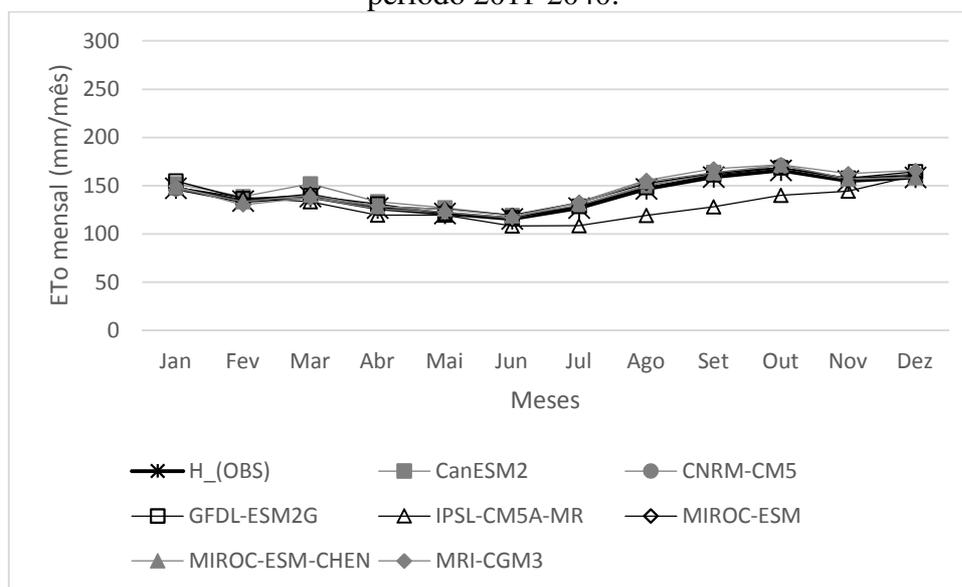
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 81 – Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de Penman-Monteith FAO56 no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.



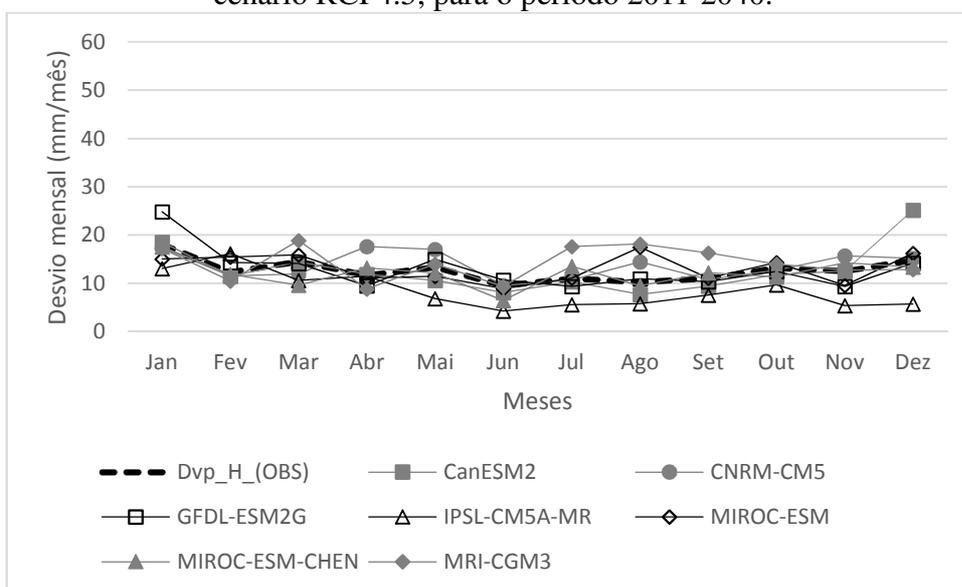
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 82 - ETo mensal estimada pelo método de Hargreaves no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.



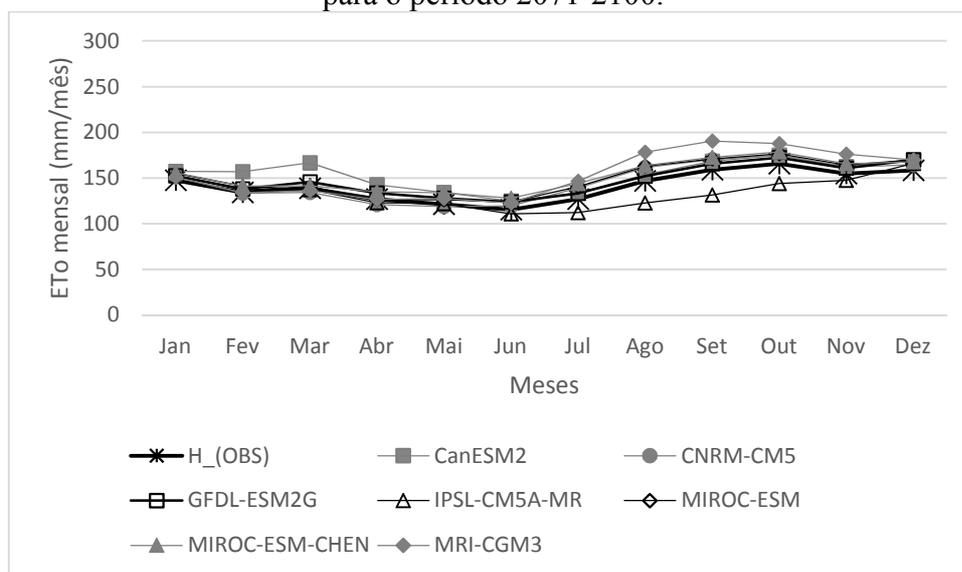
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 83 – Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.



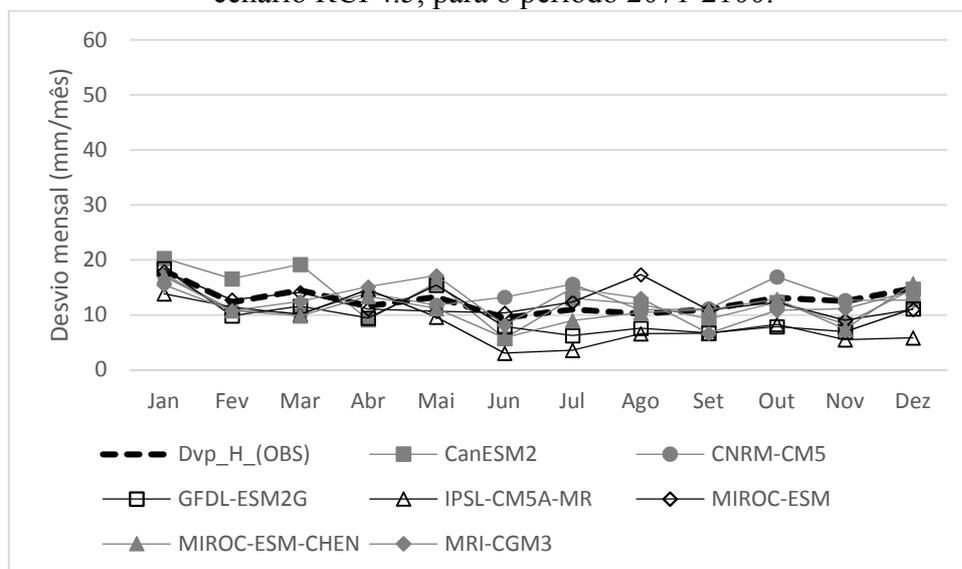
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 84 - ETo mensal estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.



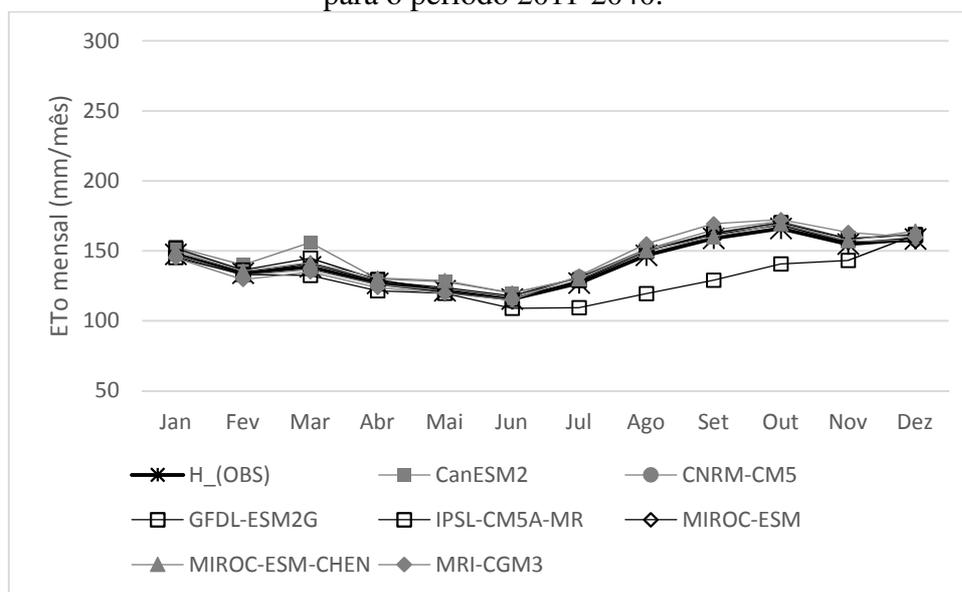
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 85 - Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.



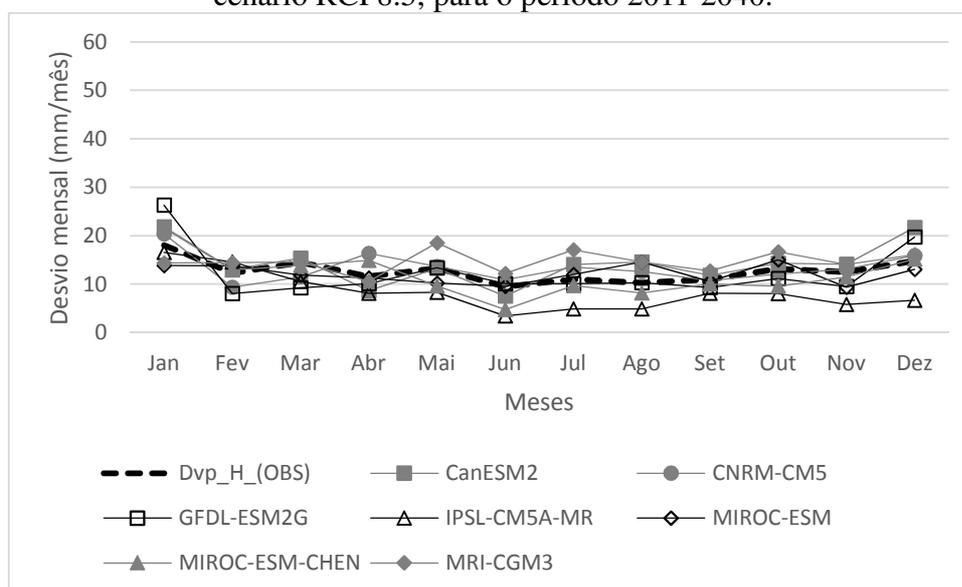
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 86 - ETo mensal estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.



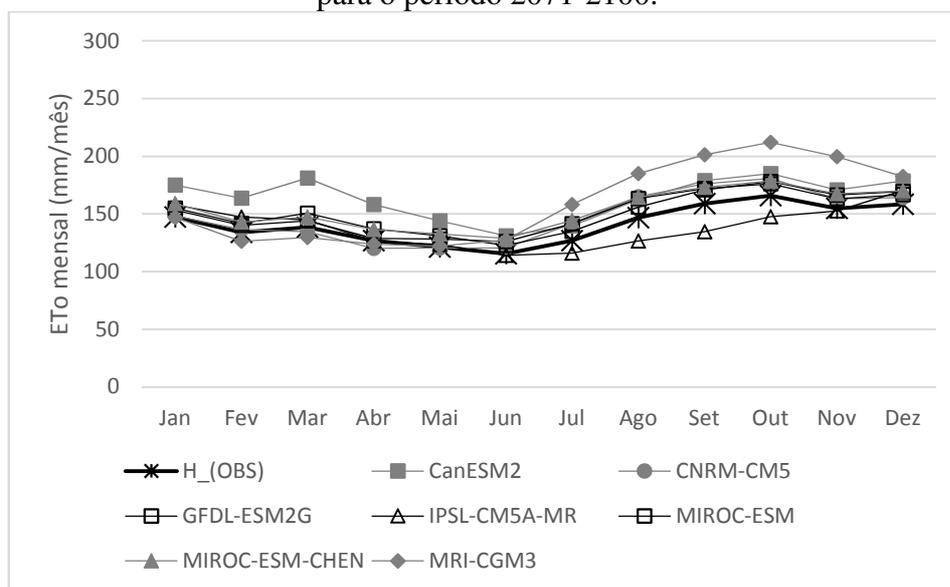
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 87 - Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.



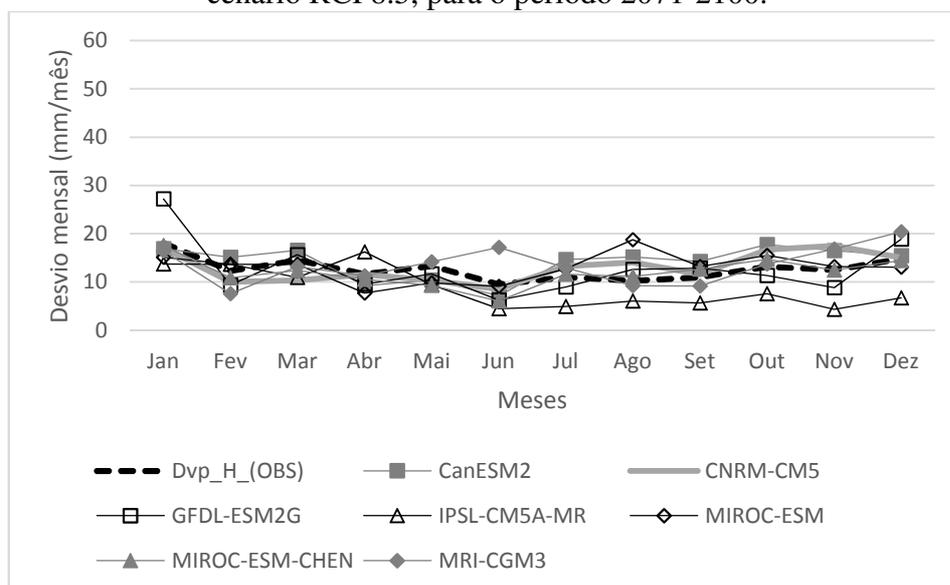
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 88 - ETo mensal estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.



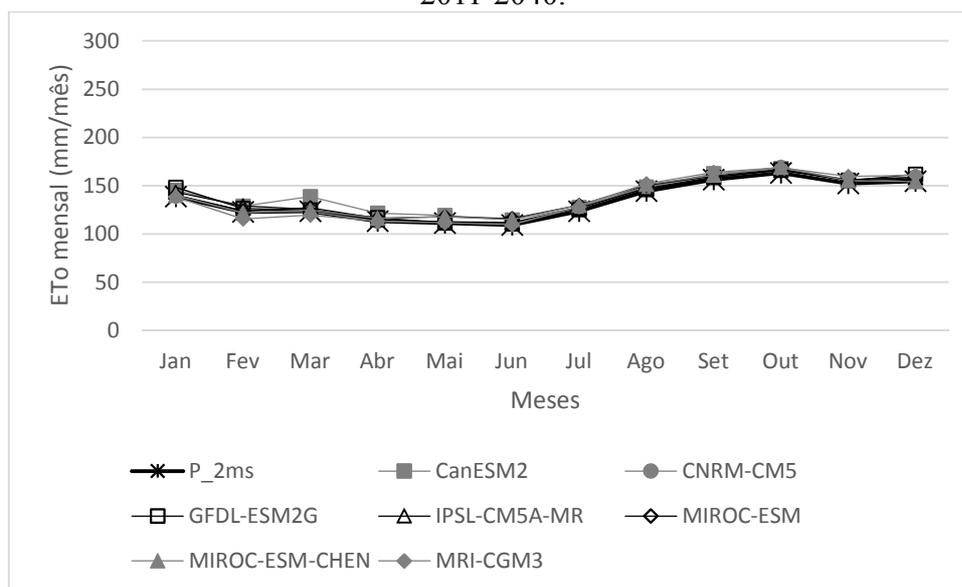
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 89 - Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de Hargreaves-Samani no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.



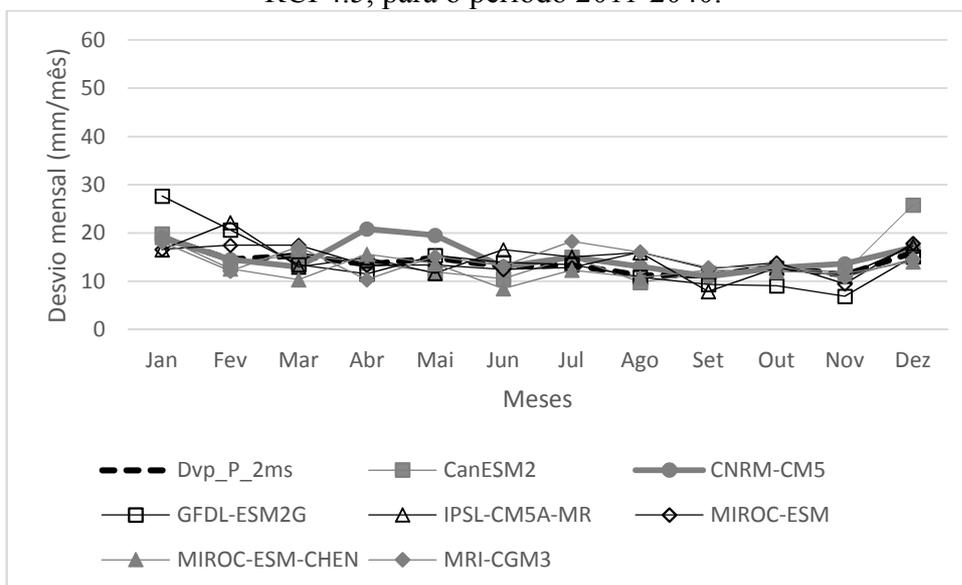
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 90 - ETo mensal estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.



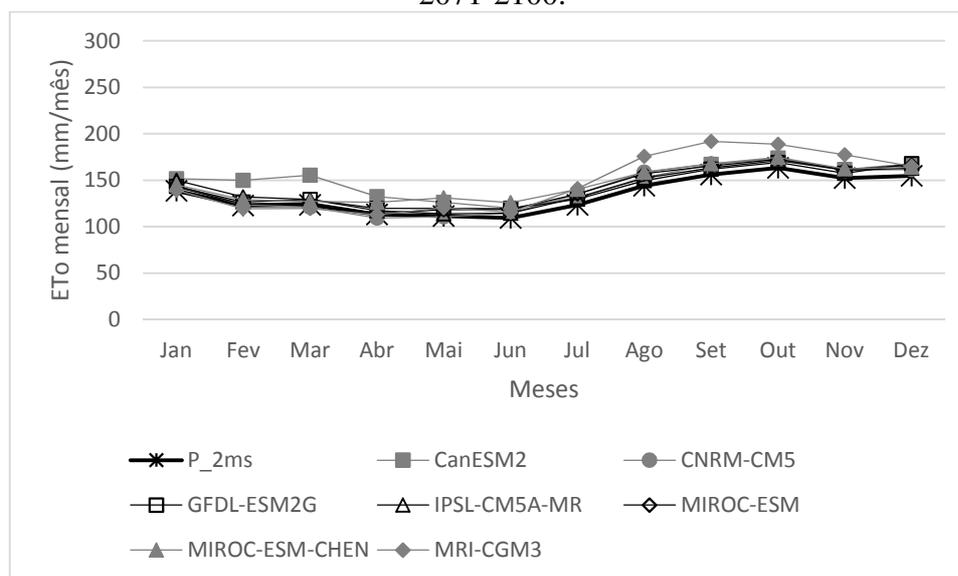
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 91 - Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.



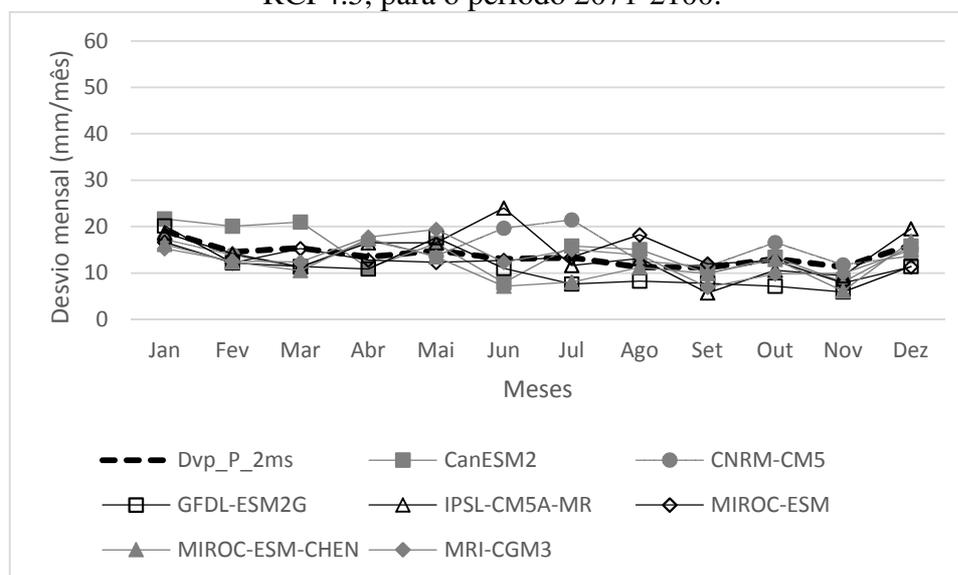
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 92 - ETo mensal estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.



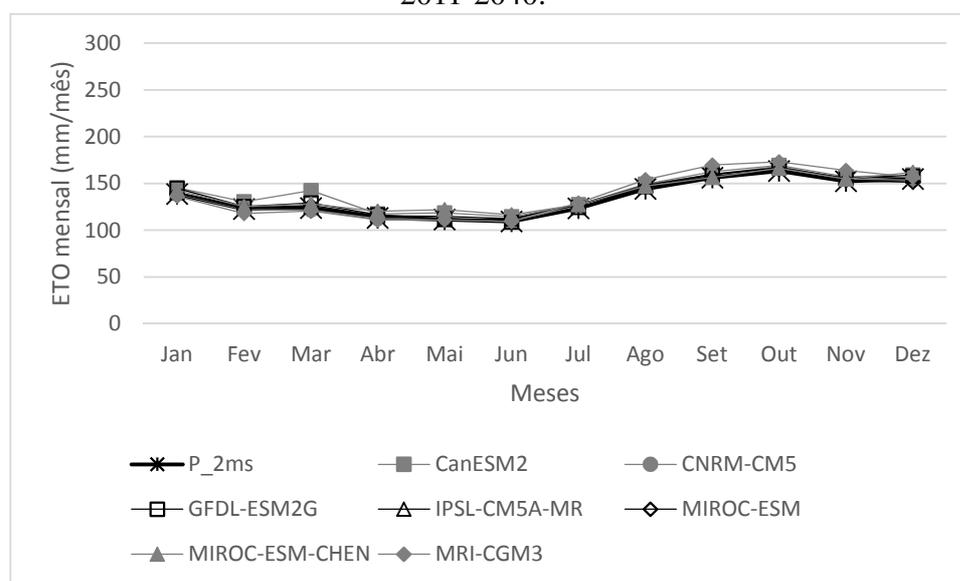
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 93 - Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.



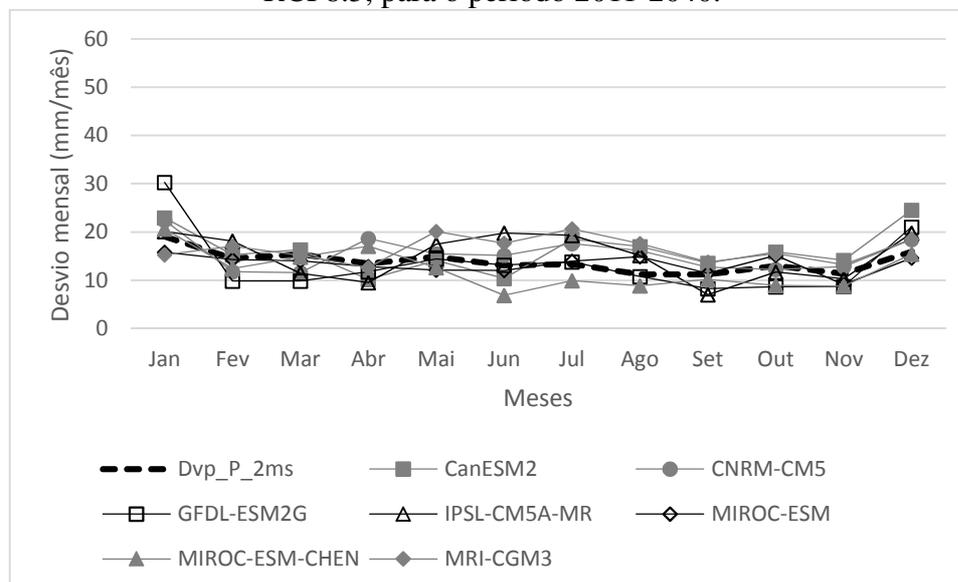
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 94 - ETo mensal estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.



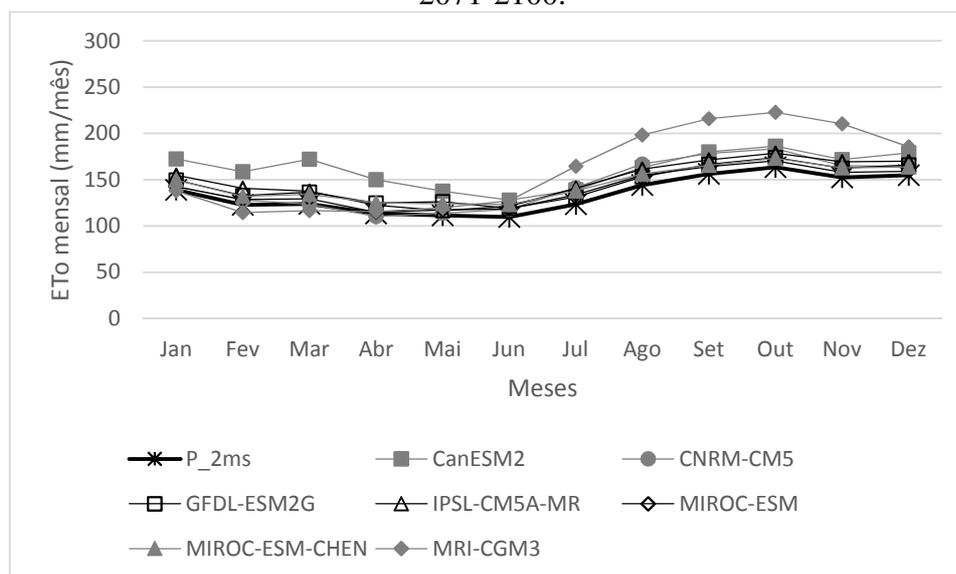
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 95 - Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.



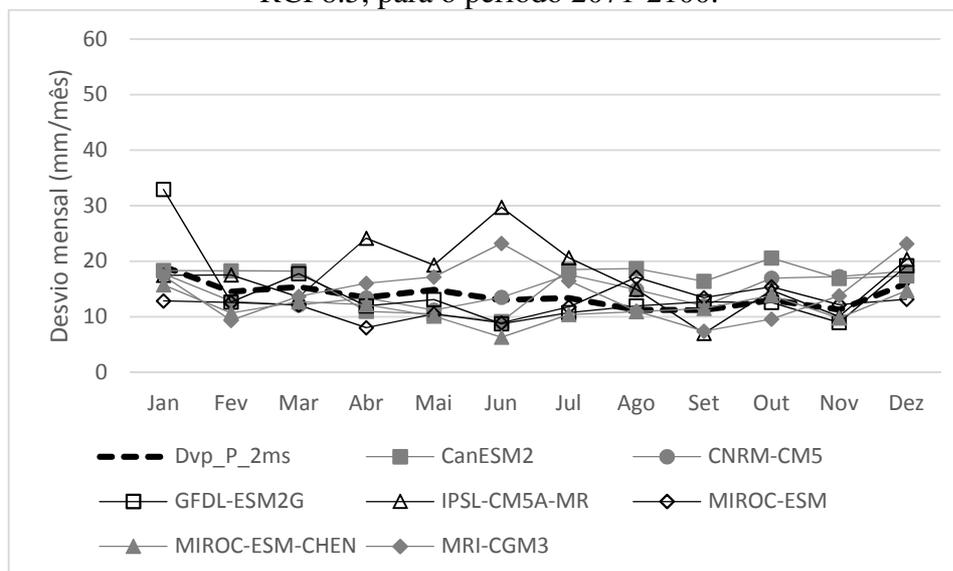
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 96 - ETo mensal estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 97 - Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P_2ms no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.

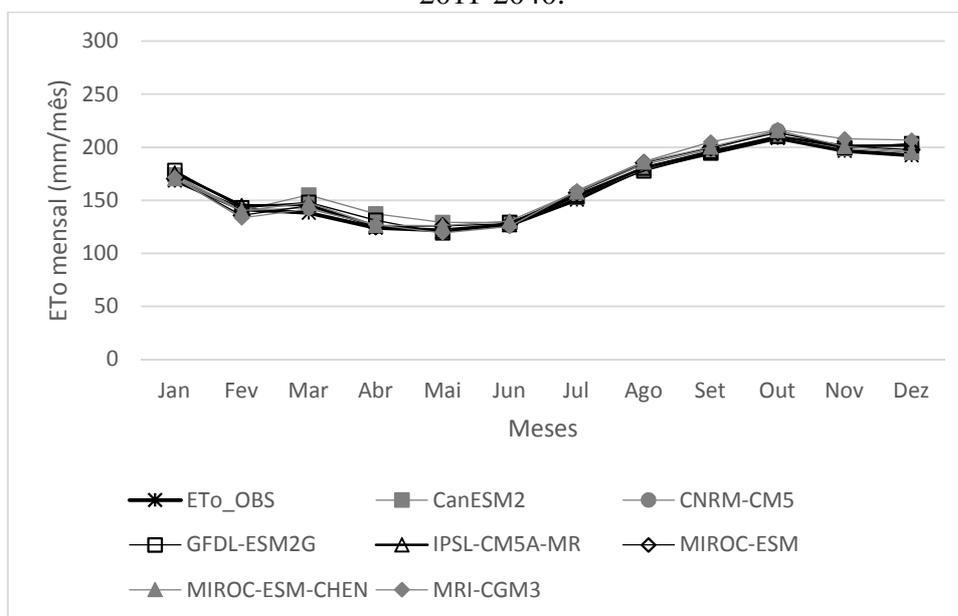


Fonte: Elaborado pelo Autor.

APÊNDICE B

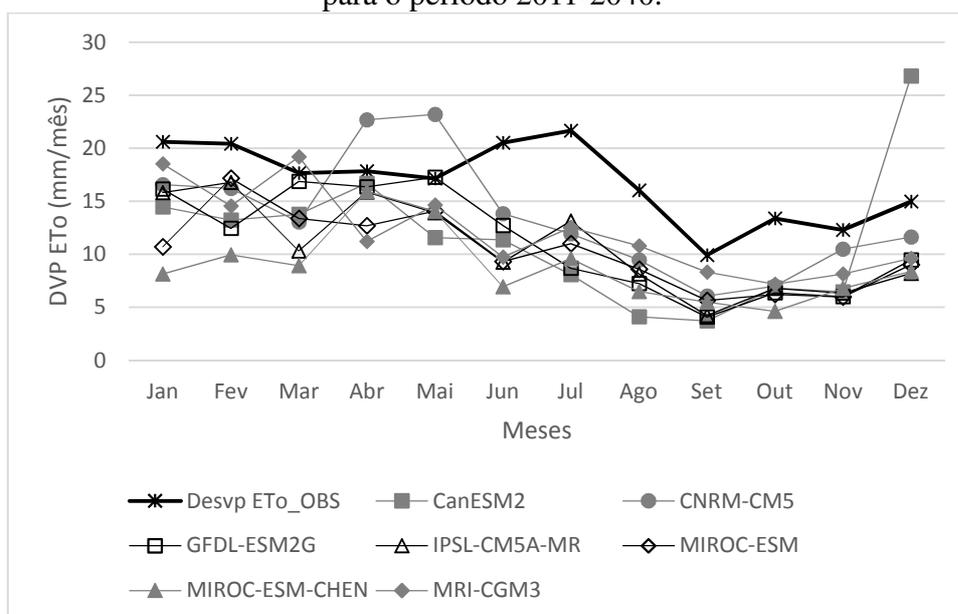
FIGURAS REFERENTES À ANÁLISE DAS VARIÁVEIS “ET₀”, “PRECIPITAÇÃO” E “VAZÃO” PARA A REGIÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO JAGUARIBE

Figura 98 – ET₀ mensal estimada pelo método de P(H) no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.



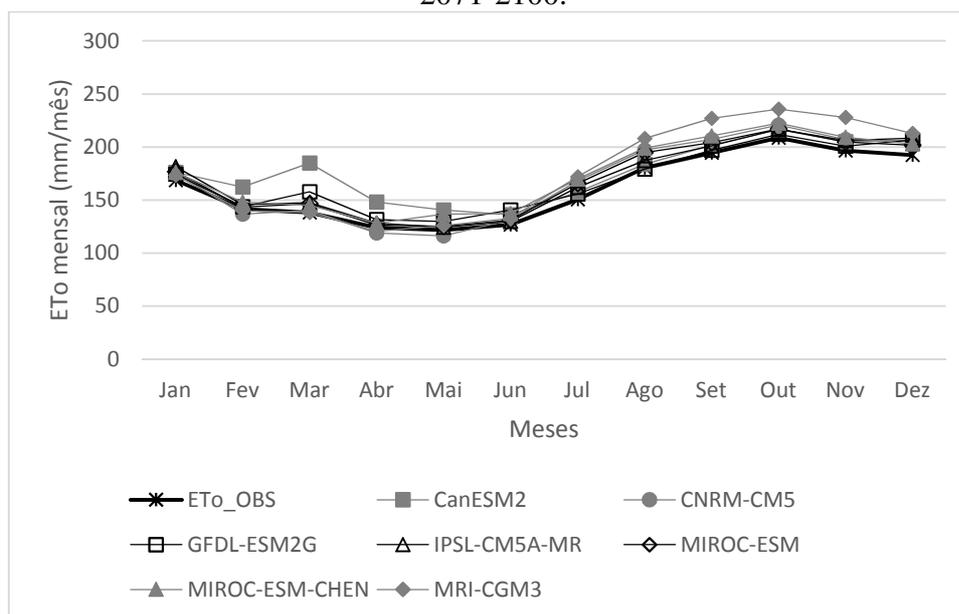
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 99 – Desvio padrão mensal da ET₀ estimada pelo método de P(H) no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.



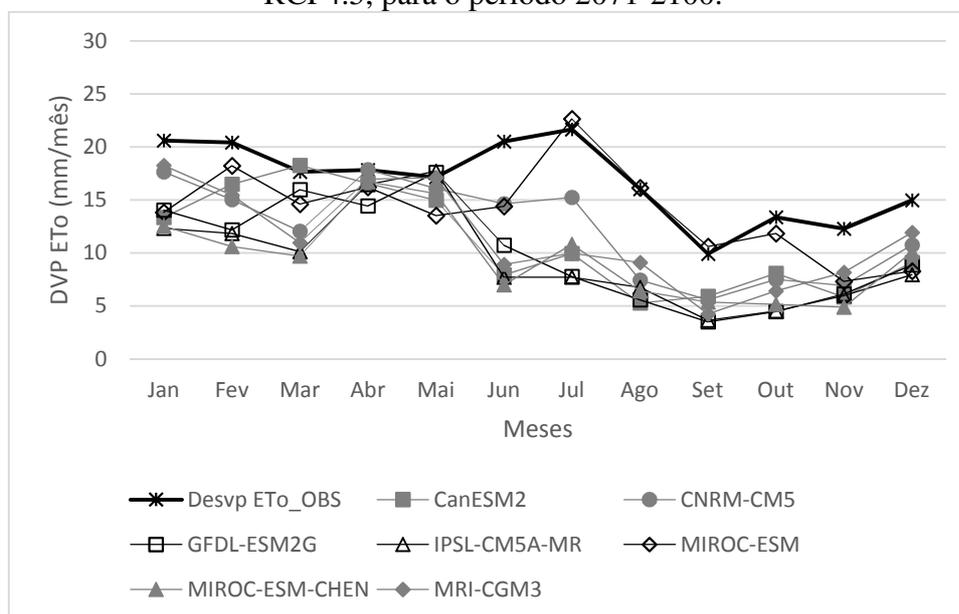
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 100 – ETo mensal estimada pelo método de P(H) no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.



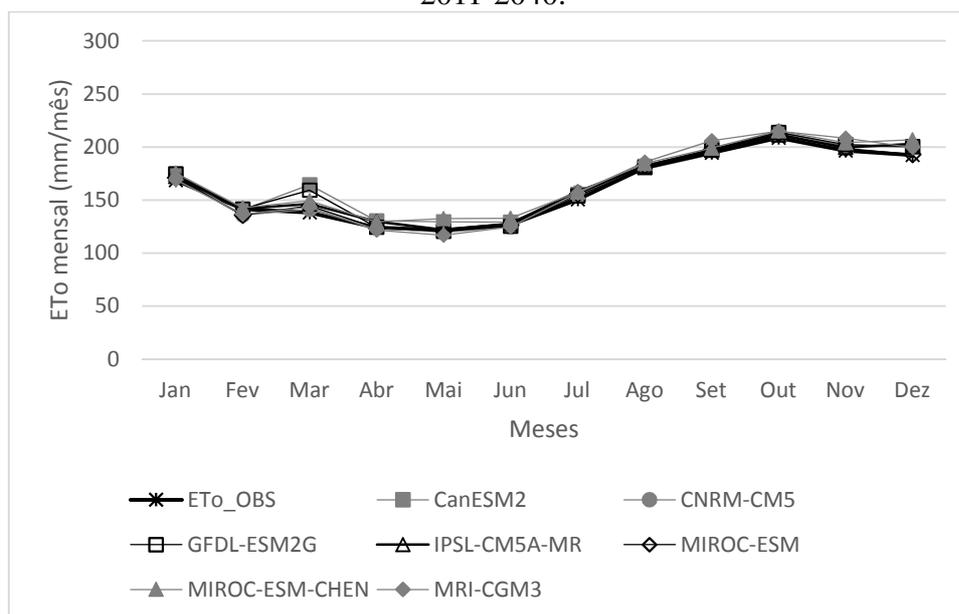
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 101 – Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P(H) no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.



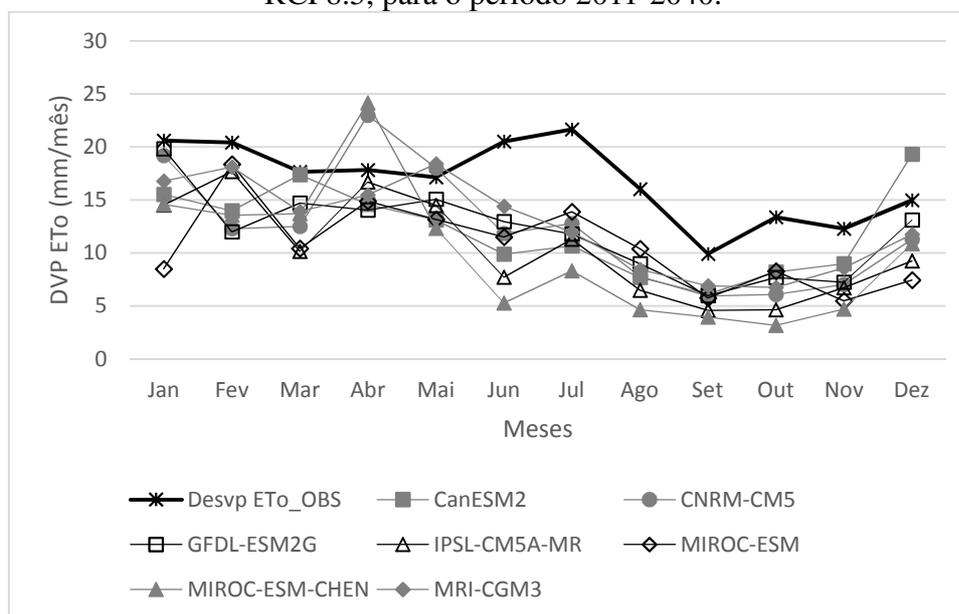
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 102 – ETo mensal estimada pelo método de P(H) no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.



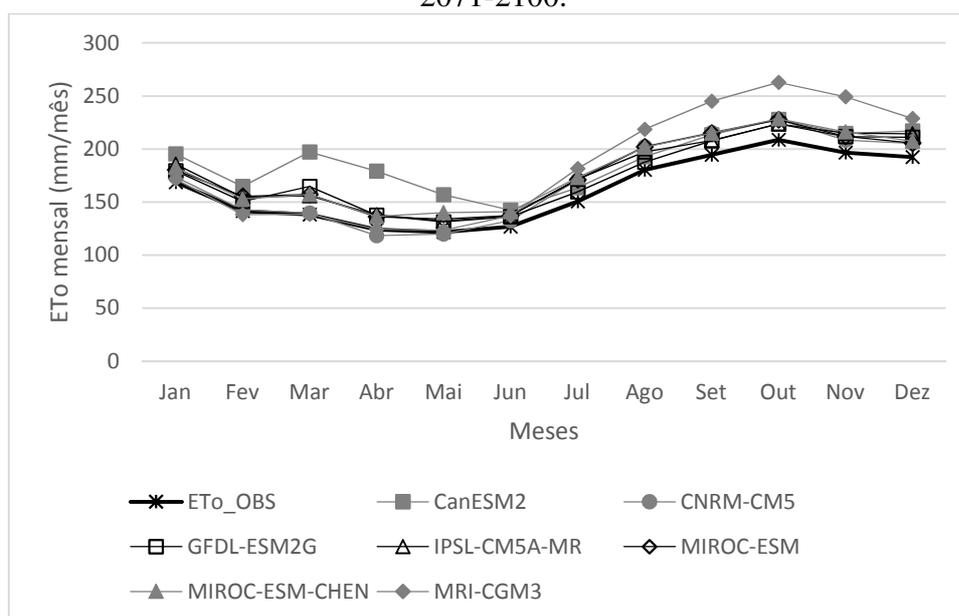
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 103 – Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P(H) no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.



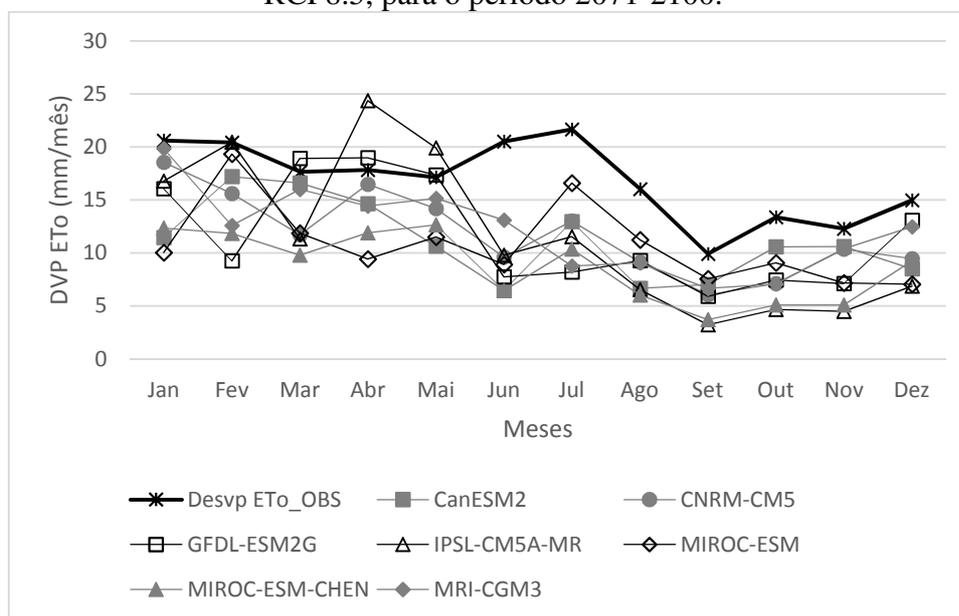
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 104 – ETo mensal estimada pelo método de P(H) no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.



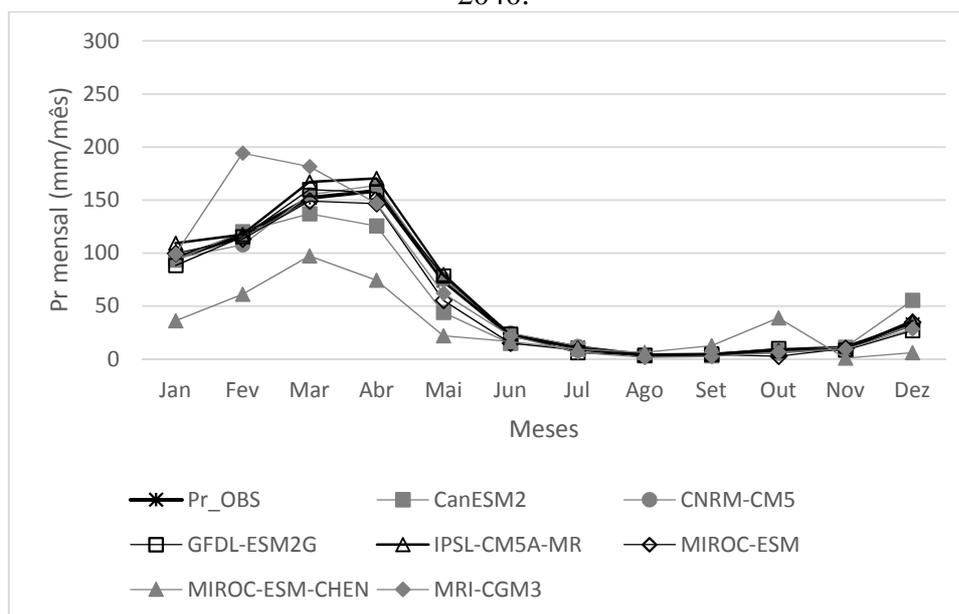
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 105 – Desvio padrão mensal da ETo estimada pelo método de P(H) no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.



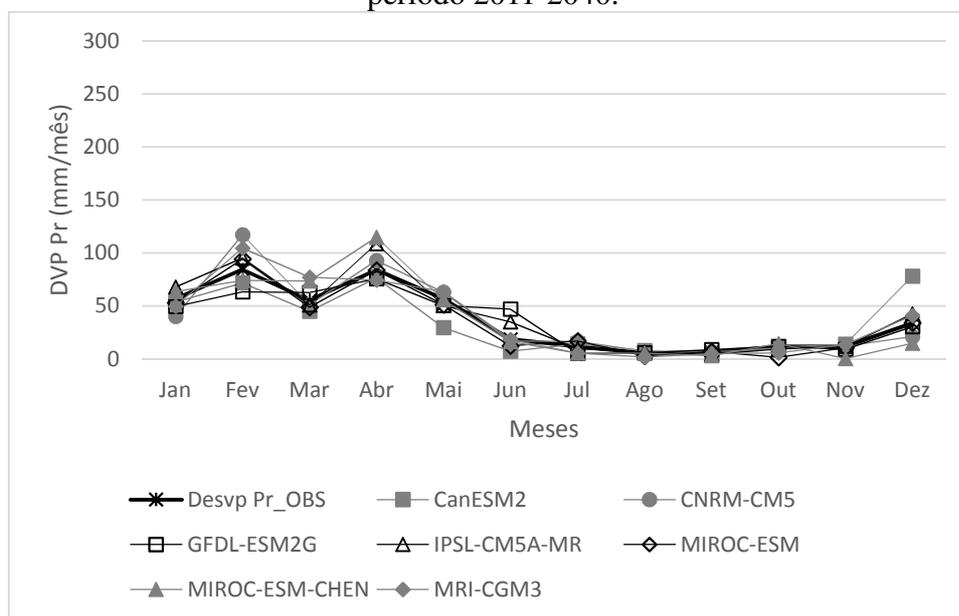
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 106 – Precipitação (Pr) mensal projetada no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.



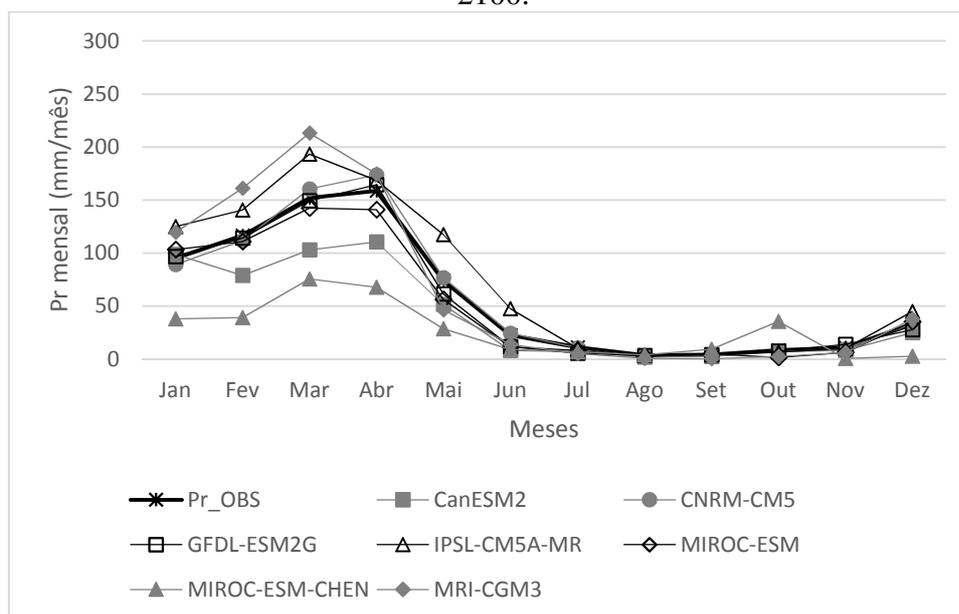
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 107 – Desvio padrão mensal da precipitação (Pr) projetada no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.



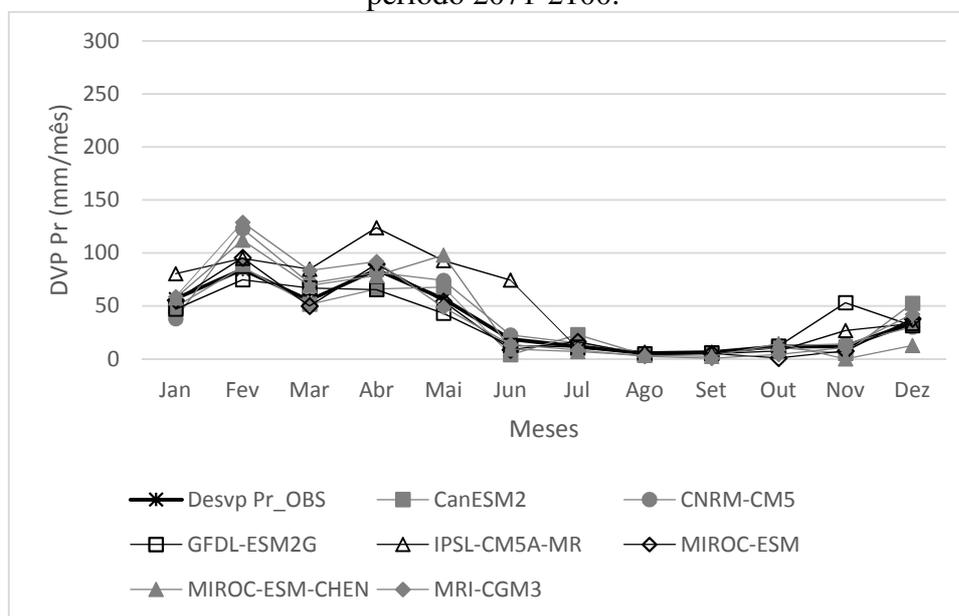
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 108 – Precipitação (Pr) mensal projetada no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.



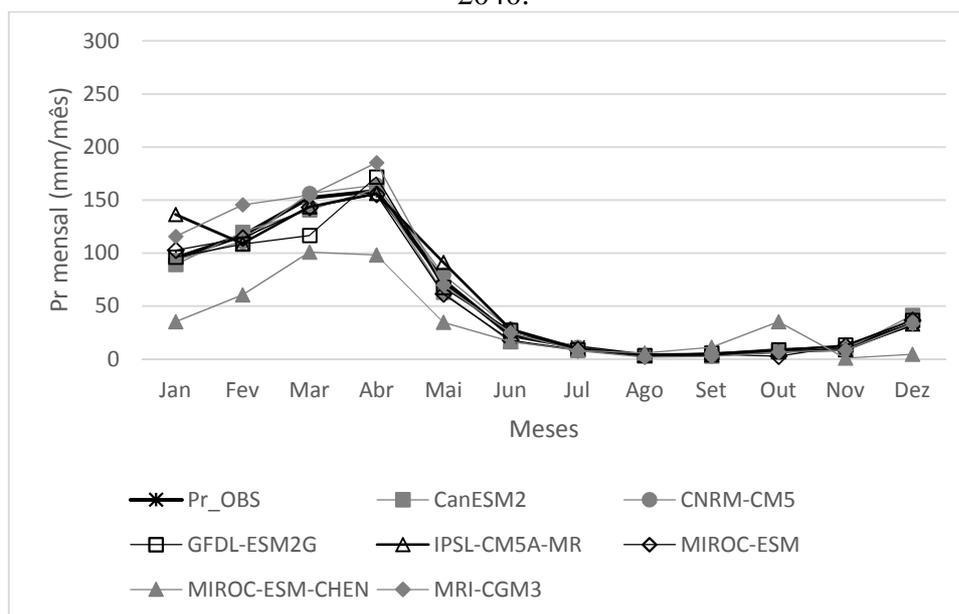
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 109 – Desvio padrão mensal da precipitação (Pr) projetada no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.



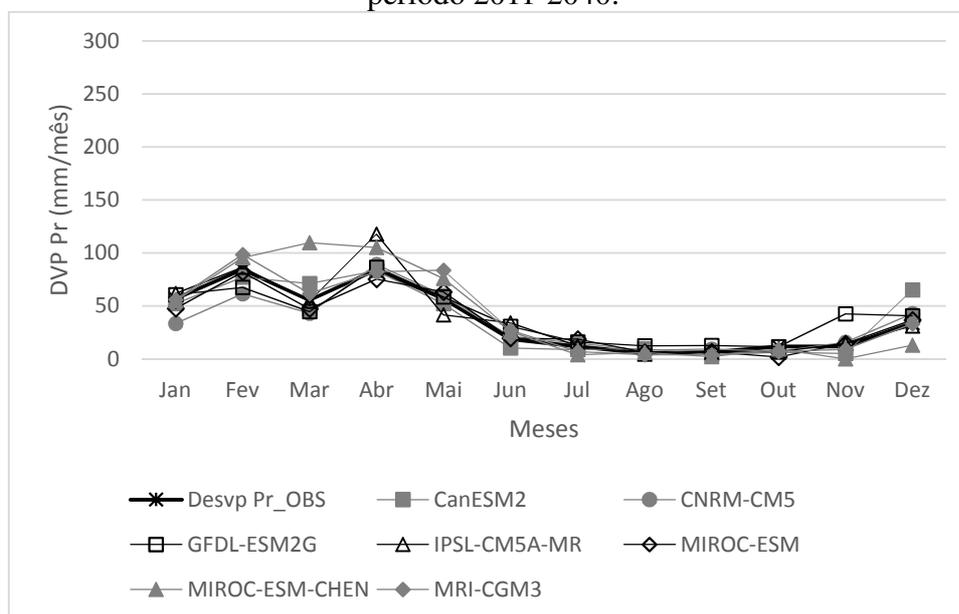
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 110 – Precipitação (Pr) mensal projetada no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.



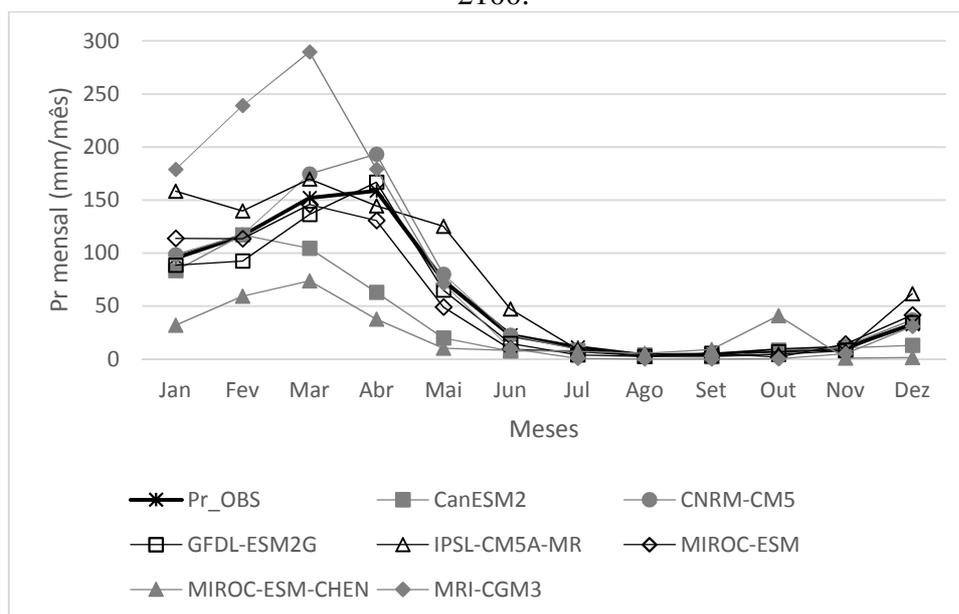
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 111 – Desvio padrão mensal da precipitação (Pr) projetada no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.



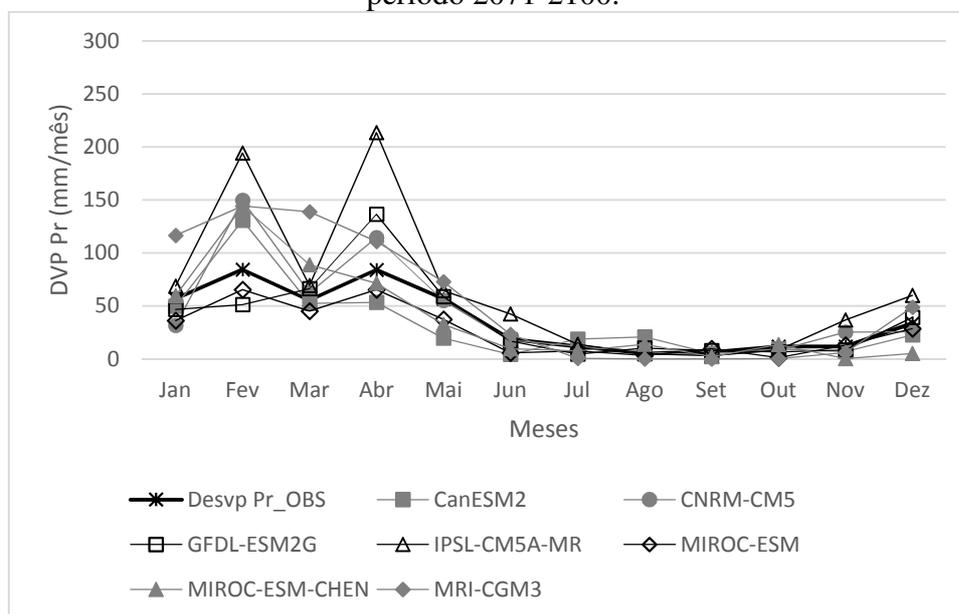
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 112 – Precipitação (Pr) mensal projetada no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.



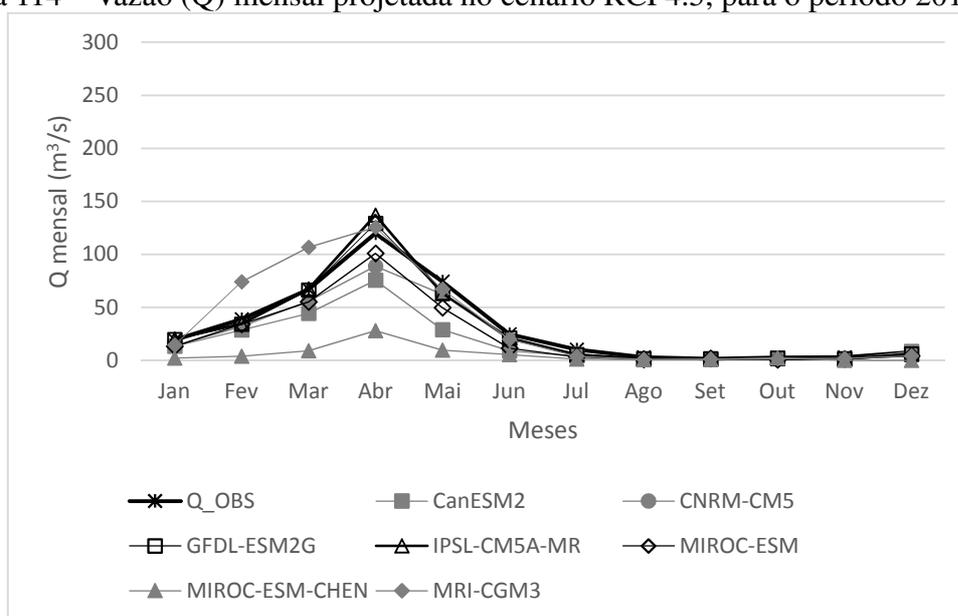
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 113 – Desvio padrão mensal da precipitação (Pr) projetada no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.



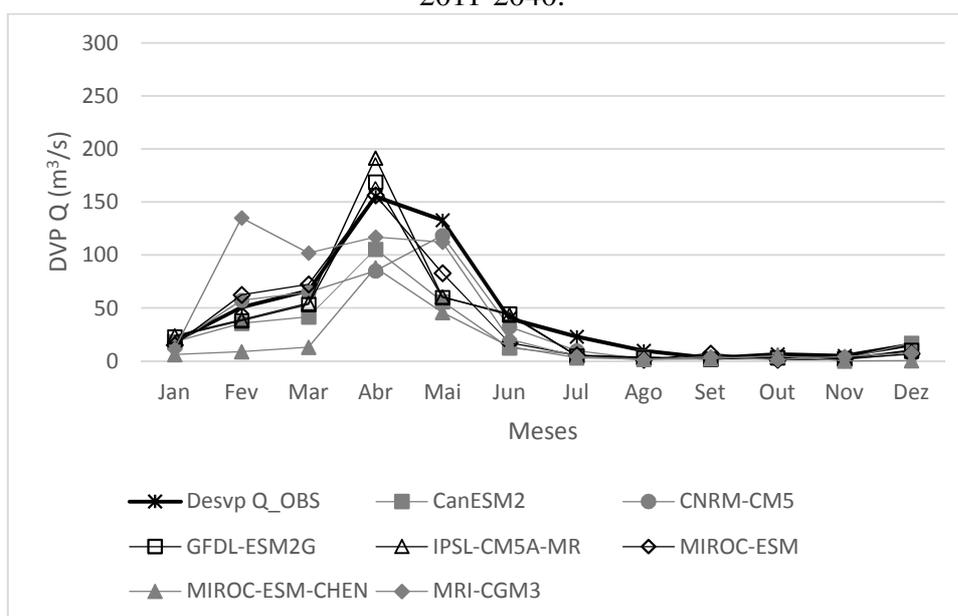
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 114 – Vazão (Q) mensal projetada no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.



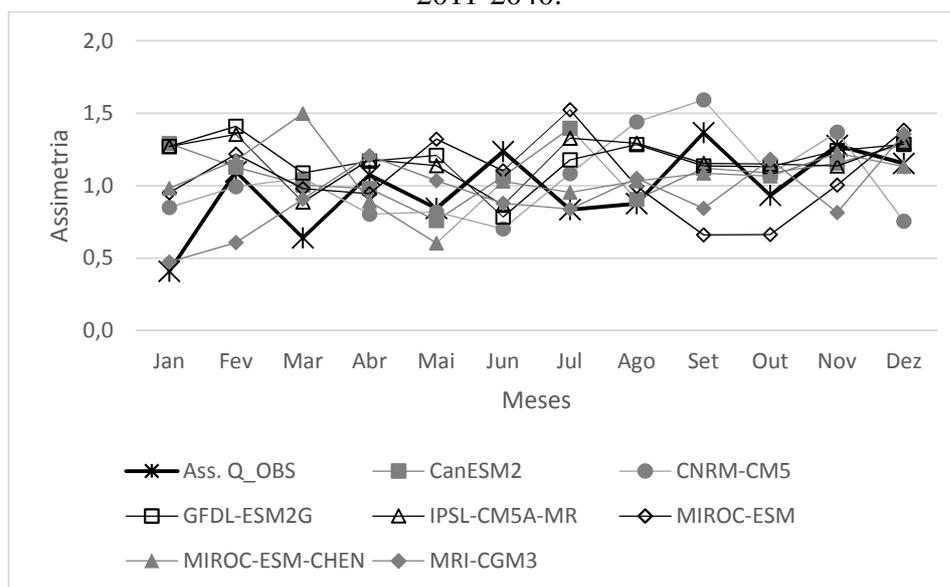
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 115 – Desvio padrão mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.



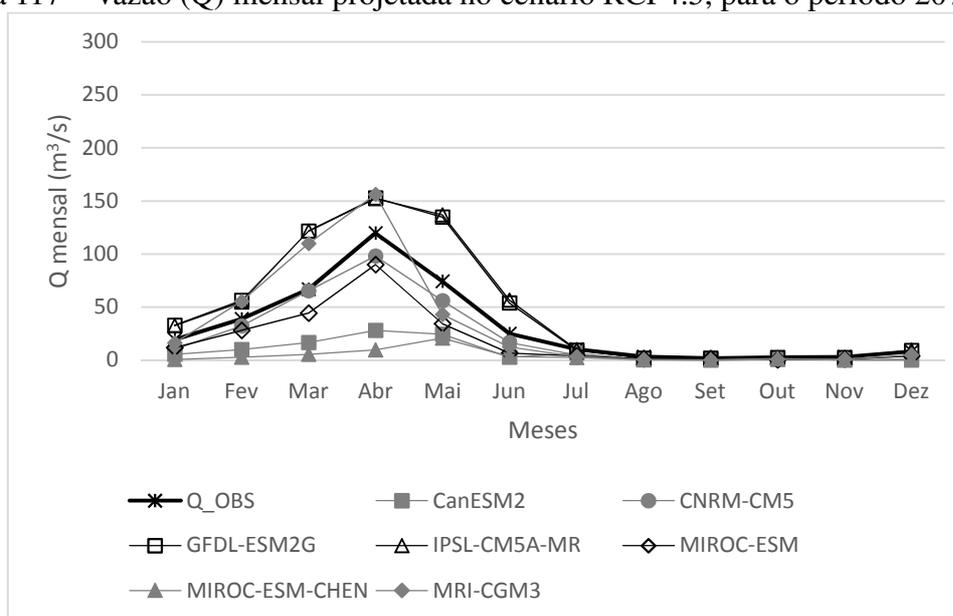
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 116 – Assimetria mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP4.5, para o período 2011-2040.



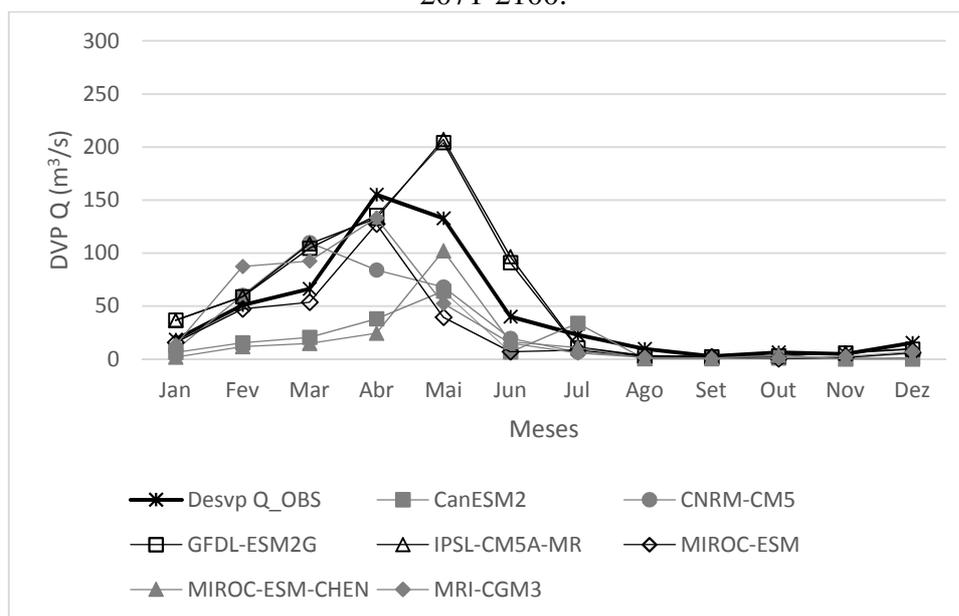
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 117 – Vazão (Q) mensal projetada no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.



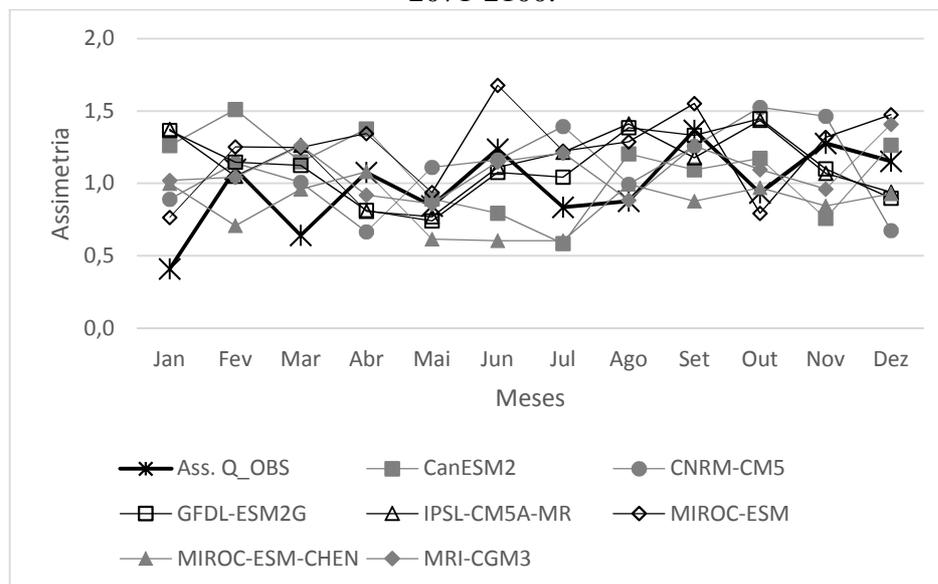
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 118 – Desvio padrão mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.



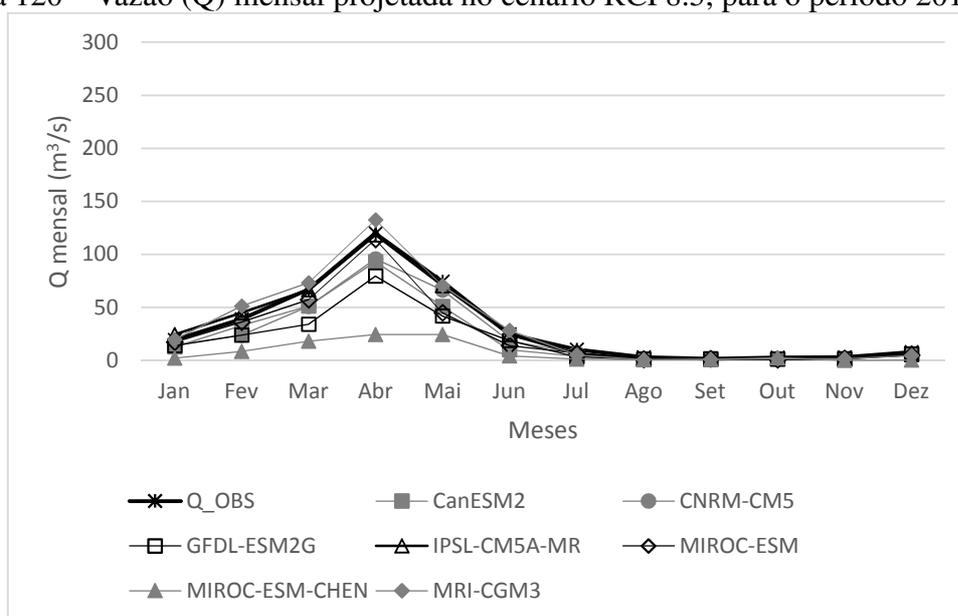
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 119 – Assimetria mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP4.5, para o período 2071-2100.



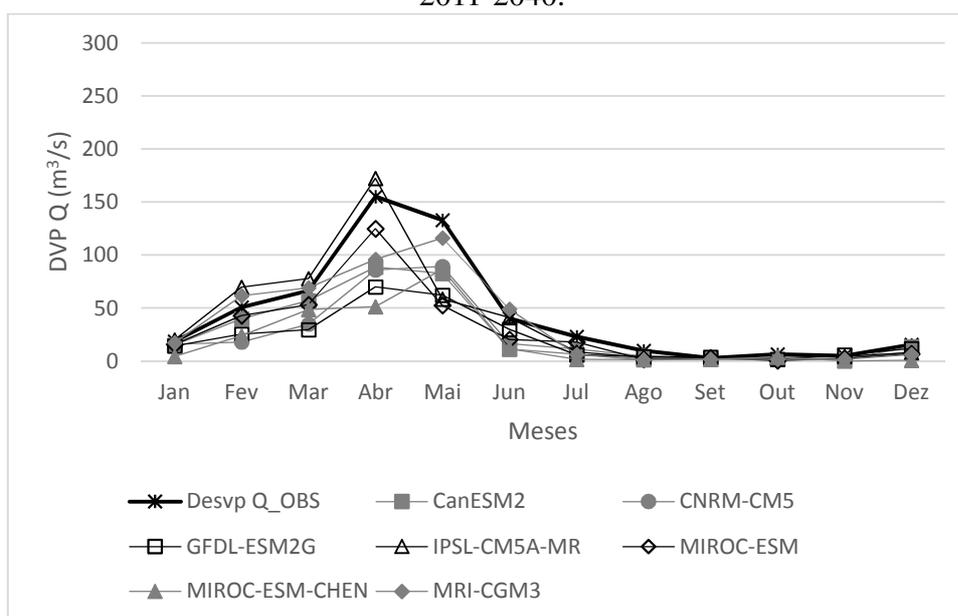
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 120 – Vazão (Q) mensal projetada no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.



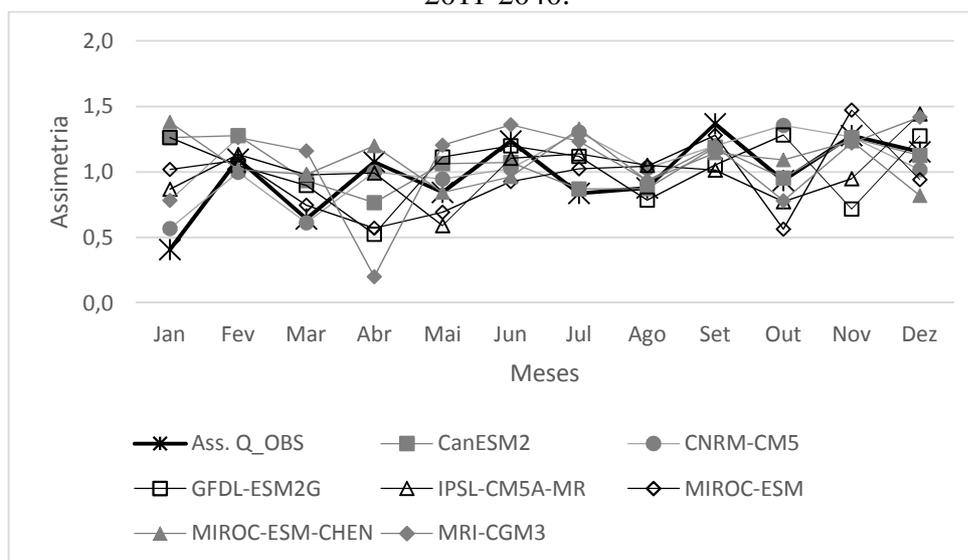
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 121 – Desvio padrão mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.



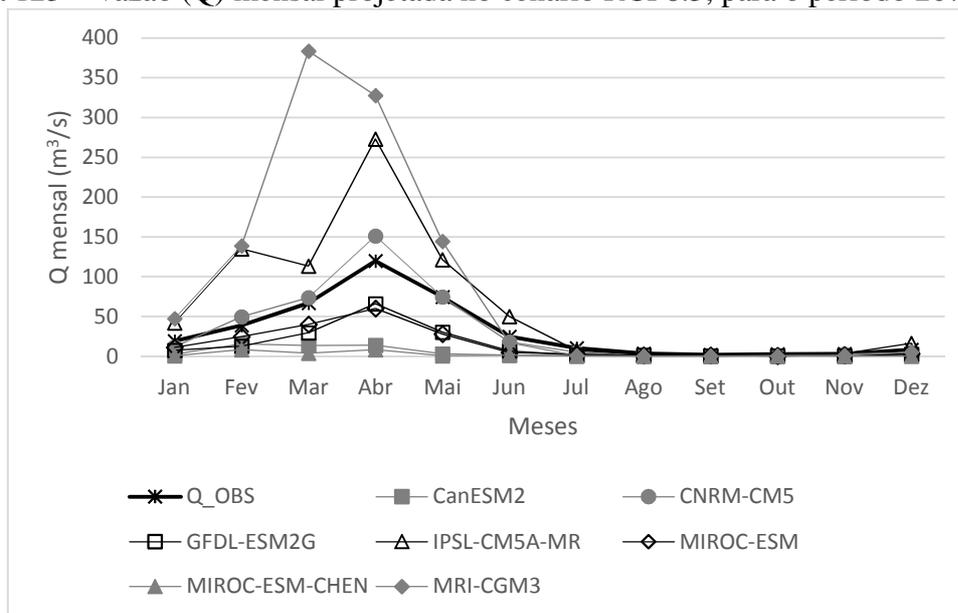
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 122 – Assimetria mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP8.5, para o período 2011-2040.



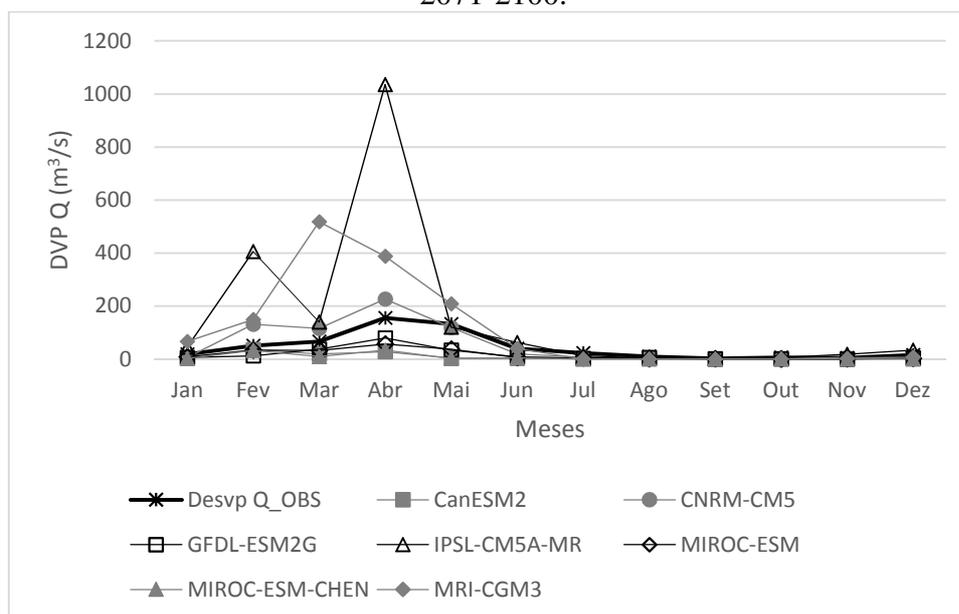
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 123 – Vazão (Q) mensal projetada no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.



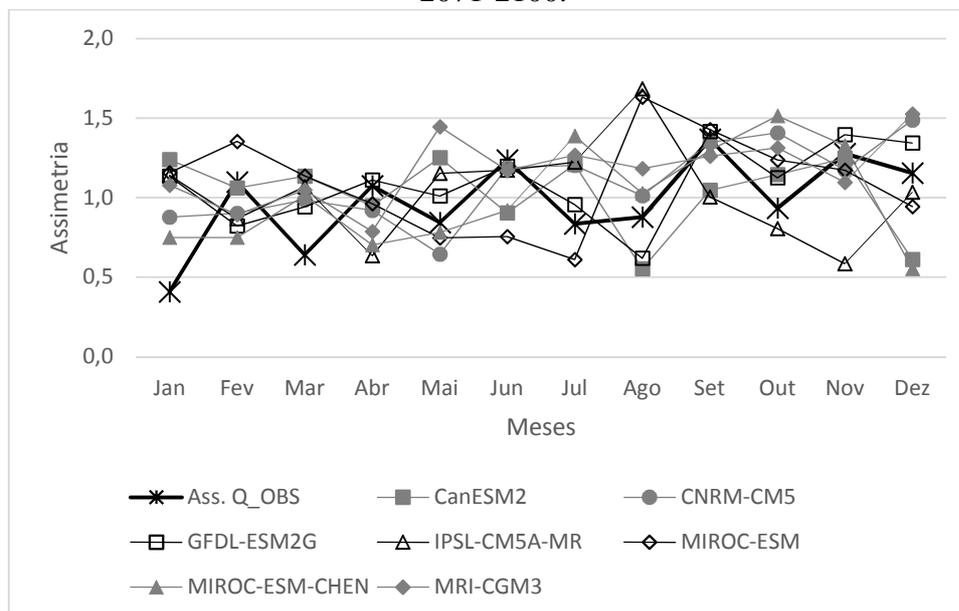
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 124 – Desvio padrão mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 125 – Assimetria mensal da vazão (Q) projetada no cenário RCP8.5, para o período 2071-2100.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

APÊNDICE C
TABELA T DE STUDENT

gl/P	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,158	0,325	0,51	0,727	1	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,886	2,92	4,303	6,965	9,925	31,598
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,25	1,638	2,353	3,182	4,541	5,541	12,924
4	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,19	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,61
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,92	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,134	1,44	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,13	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,365	3,499	5,408
8	0,13	0,262	0,399	0,546	0,706	0,889	1,108	1,397	1,86	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,1	1,383	1,833	2,262	2,821	3,25	4,781
10	0,129	0,26	0,397	0,542	0,7	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,129	0,26	0,396	0,54	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,128	0,259	0,395	0,539	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,128	0,259	0,394	0,538	0,694	0,87	1,079	1,35	1,771	2,16	2,65	3,012	4,221
14	0,128	0,258	0,393	0,537	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,14
15	0,128	0,258	0,393	0,536	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,128	0,258	0,392	0,535	0,69	0,865	1,071	1,337	1,746	2,12	2,583	2,921	4,015
17	0,128	0,257	0,392	0,534	0,689	0,863	1,069	1,333	1,74	2,11	2,567	2,898	3,965
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,688	0,862	1,067	1,33	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,687	0,86	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,85
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,08	2,518	2,831	3,819
22	0,127	0,256	0,39	0,532	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,127	0,256	0,39	0,532	0,685	0,858	1,06	1,319	1,714	2,069	2,5	2,807	3,767
24	0,127	0,256	0,39	0,531	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,127	0,256	0,39	0,531	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,06	2,485	2,787	3,726
26	0,127	0,256	0,39	0,531	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,127	0,256	0,389	0,531	0,684	0,856	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,69
28	0,127	0,256	0,389	0,53	0,683	0,856	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,127	0,256	0,389	0,53	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659
30	0,127	0,256	0,389	0,53	0,683	0,854	1,055	1,31	1,697	2,042	2,457	2,75	3,646
40	0,126	0,255	0,388	0,529	0,681	0,851	1,05	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,126	0,254	0,387	0,527	0,679	0,848	1,046	1,296	1,671	2	2,39	2,66	3,46
120	0,126	0,254	0,386	0,526	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,98	2,358	2,617	3,373
i	0,126	0,253	0,385	0,524	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,96	2,326	2,576	3,291

Fonte: <http://www.somatematica.com.br/estat/tabelat.php>